

Entwicklung eines wandlungsfähigen Pressensystems mit Servospindelantrieb

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus–Senftenberg
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Master of Science

Jens Berding

geboren am 7. Februar 1986

in Cottbus

Vorsitzende:	Professorin Dr.-Ing. habil. Sabine Weiß
Gutachter:	Professor Dr.-Ing. Bernd Viehweger
Gutachter:	Professor Dr.-Ing. habil. Markus Bambach
Tag der mündlichen Prüfung:	02.12.2016

Berding, Jens:

Entwicklung eines wandlungsfähigen Pressensystems
mit Servospindelantrieb / Jens Berding. –

Als Ms. gedr.. – Berlin : Winter-Industries GmbH, 2017

Zugl.: .: Cottbus-Senftenberg, BTU, Diss., 2016

ISBN 978-3-86624-633-1

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Winter-Industries GmbH 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in
Datenverarbeitungsanlagen, auf Datenträgern oder im Internet und der
Übersetzung, vorbehalten.

Es wird ausschließlich chlorfrei gebleichtes
Papier (TCF) nach DIN-ISO 9706 verwendet.
Printed in Germany.

Winter-Industries GmbH

URL: <http://www.winter-industries.com>

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Konstruktion und Fertigung der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg BTU und anschließend als Leiter der Sensorfertigung bei der Promess Gesellschaft für Montage- und Prüfsysteme mbH in Berlin.

Herrn Professor Dr.-Ing. Bernd Viehweger, dem ehemaligen Inhaber des Lehrstuhls Konstruktion und Fertigung der BTU, danke ich in besonderem Maße für die hervorragende Betreuung dieser Arbeit. In allen Phasen meiner Dissertation unterstützte er mich mit wertvollen Ratschlägen und Hinweisen zur Pressentechnik und zur Konstruktionsmethodik.

Außerdem danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Markus Bambach, dem Leiter des Fachgebietes Konstruktion und Fertigung der BTU, für sein Interesse an dieser Arbeit und seine freundliche Bereitschaft zur Übernahme des Koreferates.

Auch möchte ich Frau Professorin Dr.-Ing. habil. Sabine Weiß, der Leiterin des Fachgebietes Metallkunde und Werkstofftechnik der BTU, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes meinen herzlichen Dank ausdrücken.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Dr.-Ing. Gerhard Lechler, dem Inhaber der Firma Promess, sowie dem Geschäftsführer, Herrn Dipl.-Ing. oec Florian Köhnen, für die stets sehr großzügige Unterstützung dieser Arbeit und die gewährten Freiräume.

Allen Mitarbeitern des Lehrstuhls Konstruktion und Fertigung danke ich für ihre Hilfsbereitschaft. Für seine engagierte Mitarbeit möchte ich mich vor allem bei meinem Projektpartner Herrn M. Sc. Jens Wasielewski bedanken.

Herrn René Löhr, dem Geschäftsführer der Promess Fertigung GmbH, danke ich für seinen fachkundigen Rat zu Fragen der Bauteilfertigung und seinen tatkräftigen Einsatz bei der Fertigung des Prototyps.

Mein besonderer Dank gilt abschließend den Herren Dr.-Ing. Matthias Führer und Prof. Dr.-Ing. Philip Grützner für ihre jahrelange gute Zusammenarbeit an diesem und an weiteren Forschungs- und Entwicklungsprojekten im universitären und industriellen Umfeld.

Kurzfassung

Unternehmen der Umformtechnik sehen sich vermehrt steigenden Anforderungen bei schwankenden Einflussfaktoren ausgesetzt. Für eine wirtschaftliche Fertigung sind Pressen erforderlich, die sich den steigenden Anforderungen und schwankenden Einflussfaktoren anpassen und mit möglichst hoher Produktivität, Qualität und Wirtschaftlichkeit eine breite Produktpalette fertigen können.

Unter diesen Voraussetzungen bietet sich der Einsatz von kraftgebundenen Servospindelpressen an. Diese ermöglichen frei programmierbare Stößelbewegungsprofile und stellen die Nennkraft über den gesamten Stößelhub zur Verfügung. Allerdings erfüllen die bekannten Servospindelpressen die Forderung nach wandlungsfähigen Pressen, welche an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden, besonders die Änderung der Abfolge von Teilprozessen und der Austausch von Maschinenkomponenten, nur sehr eingeschränkt. Aus diesem Grund wird ein neuartiges wandelbares Pressensystem entwickelt. Dieses soll dem Anwender weitreichende Vorteile bringen: Die Nennkraft des Pressensystems wird auf mehrere, in Durchlaufrichtung der Teile frei positionierbare und miteinander koppelbare Pressenmodule mit eigenen Pressenantrieben und -stößeln aufgeteilt. Durch Servospindelantriebe werden prozessangepasste Stößelbewegungsprofile für einzelne Teilprozesse ermöglicht. Dies erlaubt eine wandelbare Anordnung von Teilprozessen, wodurch die Prozesskette skaliert werden kann. Unterstützt wird die Wandlungsfähigkeit des Pressensystems, indem es durch den Anwender erweitert werden kann und sich weitere Prozesse wie Schweißen, Löten oder Kleben integrieren lassen.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung des beschriebenen wandlungsfähigen Pressensystems mit Servospindelantrieb für die Komplettbearbeitung von kleinen Bauteilen. Grundlage bildet die Untersuchung des Standes der Pressentechnik und der Methoden der Produktentwicklung. Der Entwicklungsprozess wird in die Phasen Anforderungsfindung, Konzeptfindung und Entwurfsfindung gegliedert. Zur Überprüfung wird aus dem Entwurf ein Prototyp ausgearbeitet. Im Anschluss werden Maßnahmen zur Produktstrukturierung durchgeführt, aus denen die Weiterentwicklung des Entwurfes zu einer Typengruppe und einem Baukastensystem resultiert. Zum Abschluss wird das Pressensystem bewertet, sein Einsatzspektrum beschrieben und das Pressensystem innerhalb bestehender Pressen eingeordnet.

Abstract

Companies that supply forming technology are confronted with increasing demands and varying influences. Nowadays, presses which can be adapted to more stringent requirements and changing influencing factors are a prerequisite for an economical production. These presses have to manufacture a wide range of products with high productivity and quality while considering the costs.

In the light of the above, the use of force-linked servo-presses with ball screw is recommended. These servo screw presses permit a freely programmable ram's movement and constant press force during the ram's stroke. Even so, the known servo screw presses only satisfy insufficiently the demand for changeable presses, which can be adapted to various requirements. Examples of changeability in forming technology are the modification of the sequence of subprocesses or the replacement of machine components. For that reason, a new changeable press system is to be developed. This is intended to bring the following advantages for the user: The nominal force is allocated to several press modules with separate press drives and rams, which can be positioned freely and combined to other press modules. The servo-drive with ball screw enables a process-adapted ram's movement for separated subprocesses. By this means, the sequence of subprocesses is changeable and the process chain can be scaled. The changeability is contributed by the possibility to extend the press system as well as to integrate further processes such as welding, soldering and adhesive bonding.

The objective of this examination is to develop a changeable press system with servo-drive and ball screw for all-in-one processing of small components. Basis therefor is an investigation into the state of press technology and product development methods. The product development process is divided into three phases: the requirements analysis, the conceptual design and the embodiment design. In order to verify the embodiment design, a detail design for a prototype is being compiled. Subsequently, product structuring methods are implemented. These further development results in a type group and a modular system. Finally, the changeable press system is valued, the range of applications is explained and a classification within existing presses will be given.

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht genutzt und die den genutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Erkenntnisse.....	3
2.1	Pressentechnik.....	3
2.1.1	Allgemeine Einsatzgebiete von Pressen.....	3
2.1.2	Einteilung von Pressen.....	4
2.1.3	Arbeitsbereiche verschiedener Pressen.....	12
2.1.4	Servopressen.....	13
2.1.5	Einsatz von Servopressen in der Industrie und Forschung.....	18
2.1.6	Betrachtung von Servopressen im Rahmen der Industrie 4.0.....	21
2.1.7	Wandlungsfähige Pressen.....	24
2.1.8	Aufbau einer Servospindelpresse.....	26
2.1.9	Einteilung der Pressenwerkzeuge zur Blechbearbeitung.....	31
2.1.10	Schutzrechte mit Bezug auf die Entwicklung des Pressensystems.....	33
2.1.11	Problemstellung.....	34
2.2	Produktentwicklung.....	36
2.2.1	Methoden der Produktentwicklung.....	36
2.2.2	Methoden zum Ermitteln von Anforderungen.....	37
2.2.3	Methoden zum Erstellen der Funktionsstruktur.....	39
2.2.4	Methoden zum Finden von Wirkprinzipien.....	40
2.2.5	Methoden zum Bewerten von Wirkprinzipien.....	45
2.2.6	Gestaltungsleitlinien beim Entwurf.....	50
2.2.7	Produktstrukturierung.....	51
3	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	57
3.1	Zielsetzung.....	57
3.2	Lösungsidee.....	58
3.3	Vorgehensweise.....	59
4	Entwicklung des Pressensystems.....	61
4.1	Vorgehensweise bei der Entwicklung.....	61
4.2	Zusammenstellen der Anforderungen.....	63
4.3	Aufstellen des Konzeptes.....	66
4.3.1	Formulieren des grundsätzlichen Problems.....	66
4.3.2	Aufstellen der Funktionsstruktur.....	67

4.3.3	Finden der Wirkprinzipien.....	75
4.3.4	Auswählen und Bewerten der Wirkprinzipien.....	81
4.3.5	Konzeptionieren des Werkzeugwechselsystems.....	96
4.3.6	Darstellen der Prinzipiellen Lösung als Bauzusammenhang.....	99
4.4	Ableiten des Entwurfes.....	101
4.4.1	Gliedern in realisierbare Module.....	101
4.4.2	Gestalten des Moduls „Pressenmodul“.....	104
4.4.3	Gestalten der Komponente „kuppelbarer Positionierantrieb“.....	105
4.4.4	Gestalten des gesamten Produktes.....	110
4.5	Ausarbeiten der Konstruktion.....	111
4.6	Erproben des Prototyps.....	112
5	Produktstrukturierung des Pressensystems.....	117
5.1	Zielsetzung und Vorgehensweise der Produktstrukturierung.....	117
5.2	Ableiten einer Baureihe und einer Typengruppe.....	118
5.2.1	Bestimmen der Stufensprünge.....	118
5.2.2	Bestimmen der variierenden und der festen Parameter.....	120
5.2.3	Entwickeln der Baureihe zur Typengruppe.....	122
5.3	Modularisieren der Produktstruktur.....	124
5.4	Entwickeln des modularen Baukastens.....	128
6	Bewertung und Einordnung des Pressensystems.....	133
6.1	Bewertung der Technologie.....	133
6.1.1	Flexible Stößelbewegungsprofile durch Servospindelantrieb.....	133
6.1.2	Begrenzte Nennkraft und Hubzahl durch Servospindelantrieb.....	135
6.1.3	Wandelbare Zuordnung von Teilprozessen und Prozessketten.....	136
6.1.4	Werkzeugwechsel.....	140
6.1.5	Prozessüberwachung.....	141
6.1.6	Eignung im Rahmen der Industrie 4.0 und Wandlungsfähigkeit.....	143
6.2	Einordnung und Einsatzgebiete des Pressensystems.....	144
7	Zusammenfassung.....	147
8	Literaturverzeichnis.....	151
9	Anhang.....	161

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

AF	Allgemeine Funktion/-en
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V.
AP	Arbeitspunkt
ARIZ	Алгоритм решения изобретательских задач: Algorithmus zur Lösung erfinderischer Aufgaben
BITKOM	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V.
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BUS	Kurz für bus bar: Datenleitung mit mehreren Strängen
CAD	Computer-aided design: Rechnerunterstütztes Entwerfen
CAE	Computer-aided engineering: Rechnerunterstützte Ingenieurarbeit
CAM	Computer-aided manufacturing: Rechnerunterstützte Fertigung
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CNC	Computerized numerical control: Rechnerunterstützte numerische Steuerung
CPS	Cyber-physisches System
E-Modul	Elastizitätsmodul
$E_{\text{Bearb.}}$	Bearbeitungsenergie
E_{Bewegung}	Bewegungsenergie
E_{Eingang}	Energie, die von außen zugeführt wird
$E_{\text{elastisch}}$	Energie der elastischen Verformung
EN	Europäische Norm
E_{pot}	Potenzielle Energie
E_{Verlust}	Verlustenergie
FE	Finite Elemente
IBU	Inkrementelle Blechumformung
ISO	International Organization for Standardization: Internationale Organisation für Normung
IUL	Institut für Umformtechnik und Leichtbau
IWU	Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
KGT	Kugelgewindetrieb
Kr	Kriterium

NC	Numerical control: Numerische Steuerung
NFC	Near field communication: Nahfeld-Kommunikation
O	Option
OT	Oberer Totpunkt
P/P _a /P _b	Messpunkt/Messpunkt auf angesteuerter Position/ Messpunkt auf tatsächlicher Position
P ₁	Messpunkt
P ₂	Kraftangriffspunkt
P ₃	Messpunkt
PDM	Produktdatenmanagement
PtU	Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen
PVDF	Polyvinylidenfluorid
Q/Q _a /Q _b	Messpunkt/Messpunkt auf angesteuerter Position/ Messpunkt auf tatsächlicher Position
R/R _a /R _b	Messpunkt/Messpunkt auf angesteuerter Position/ Messpunkt auf tatsächlicher Position
RGT	Rollengewindetrieb
Rn	Renard-Zahl
S	Standard
S _{Ausgang}	Ausgangssignal
S _{Eingang}	Eingangssignal
STEP	Standard for the exchange of product model data: Standardformat für den Austausch von Produktdaten
TF	Teilfunktion
TRIZ	теория решения изобретательских задач: Theorie zur Lösung von Aufgaben beim Erfinden
TS	Teilsystem
UT	Unterer Totpunkt
V	Varianz
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
WKZ	Werkzeug
WZH	Wirkzusammenhang
x	Abszissenachse im kartesischen Koordinatensystem
y	Ordinatenachse im kartesischen Koordinatensystem
z	Applikatenachse im kartesischen Koordinatensystem
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V.

Formelzeichen

a	mm	Abstand
a	mm	Längenmaß
a	mm/s ²	Stößelbeschleunigung
b	mm	Längenmaß
B_{\min}	€	Beschaffungskosten des preiswertesten Wirkprinzips
B_n	€	Beschaffungskosten des Wirkprinzips n
c	mm	Plattendicke
d	mm	Längenmaß
e	mm	Längenmaß
f	mm	Abstandsmaß
F	kN	Kraft
F	kN	Nennkraft
F	kN	Stößelkraft
F_N	N	Normalkraft
$F_{R,H}$	N	Haftreibungskraft
F_{Sp}	N	Nennbelastung der Spindel
H_i	€	Ideale Herstellkosten
H_n	€	Herstellkosten des Wirkprinzips n
i_G	[-]	Getriebeübersetzung
J	kg · m ²	Massenträgheitsmoment
m	kg	Masse des Gestells
m	[-]	Zählindex
M_M	Nm	Erforderliches Motor-Dauerdrehmoment
m_{PM}	kg	Masse eines Pressenmoduls
n	[-]	Zählindex
p	[-]	Punktzahl
p	m	Spindelsteigung
p_{\max}	[-]	Maximal mögliche Punktzahl
r	m	Senkrechter Abstand der Masseteilchen von der Drehachse
R_a	mm	Radius
R_i	mm	Radius
s	mm	Stichmaß
$s_{a,n}$	[-]	Stärke des Wirkprinzips n durch arithmetische Mittelwertbildung
$s_{g,n}$	[-]	Stärke des Wirkprinzips n durch geometrische Mittelwertbildung

t	mm	Plattendicke
t	mm	Vorschub
T_0	Nm	Getriebe-Leerlaufdrehmoment
u_1	mm	Verschiebung des Punktes P_1
u_2	mm	Verschiebung des Punktes P_2
u_3	mm	Verschiebung des Punktes P_3
v	mm/s	Stößelgeschwindigkeit
V	m ³	Volumen
x_n	[-]	Technische Wertigkeit des Wirkprinzips n
y_n	[-]	Wirtschaftliche Wertigkeit des Wirkprinzips n
α	°	Aufbiegungswinkel
Δu_{3-1}	mm	Differenz von u_3 und u_1
Δz_P	mm	Differenz von P_a und P_b
$\Delta z_{\text{Parallelität}}$	mm	Parallelitätsfehler
$\Delta z_{\text{Position}}$	mm	Positionierfehler
Δz_Q	mm	Differenz von Q_a und Q_b
Δz_R	mm	Differenz von R_a und R_b
η_G	[-]	Getriebewirkungsgrad
η_{Sp}	[-]	Spindelwirkungsgrad
μ_H	N	Haftreibungskoeffizient
μ_{sch}	[-]	Reibungszahl der Linear-Gleitführungsschiene
ϱ	kg/m ³	Dichte
$\partial F / \partial s$	kN/mm	Steigungsgradient

1 Einleitung

Das Umfeld produzierender Unternehmen wird zunehmend turbulenter. Unternehmen der Umformtechnik sehen sich vermehrt mit schwankenden Einflussfaktoren wie absatzseitig kürzeren Produktlebenszyklen sowie höherer Produktvielfalt und eingangsseitig unsteten Preisen, Qualitäten sowie Verfügbarkeiten von Rohstoffen konfrontiert. Komplexer werdende Bauteilgeometrien müssen beherrscht und neue Werkstoffe und Werkstoffverbunde verarbeitet werden. Auch kleinere Losgrößen sollen effizient produziert werden. Um wirtschaftlicher fertigen zu können, wird eine Komplettbearbeitung der Umformbauteile in einer Maschine angestrebt. Hierfür sind Prozessketten und Maschinen erforderlich, die sich diesen steigenden Anforderungen und schwankenden Einflussfaktoren anpassen und mit möglichst hoher Produktivität, Qualität und Wirtschaftlichkeit eine breite Produktpalette fertigen können. Auch die Energieeffizienz gewinnt in der Umformtechnik an Bedeutung. Daher müssen wettbewerbsfähige Werkzeugmaschinenhersteller dem Anstieg der Energiekosten mit Optimierung und Umgestaltung ihrer Produkte begegnen. [1] [2]

Innerhalb der Umformmaschinen verändern seit mehreren Jahren neue Entwicklungen die Sichtweise und Bewertung bezüglich ihrer Anwendung. Die Servotechnik stellt Antriebe zur Verfügung, die hochdynamische Bewegungen ermöglichen und durch feinauflösende Lagegeber präzise steuer- und regelbar sind. Zusätzlich sind Servoantriebe in hohem Maße drehzahlsteif und überlastbar. Diese Vorteile können in Umformmaschinen besonders gut genutzt werden. Pressen mit Servoantrieben erlauben frei programmierbare Weg-Zeit-Verläufe des Stößels, wodurch sich das Stößelbewegungsprofil an den Prozess anpassen, aber auch im technologiefreien Bereich optimieren lässt. Dadurch ermöglichen Servopressen eine deutliche Steigerung der Ausbringungslleistung, hohe Bauteilqualitäten sowie Standzeiten und ein intelligentes Energiemanagement durch die Rückspeisung der Bremsenergie. Die regelbare Stößelkinematik erlaubt eine optimale Anpassung an die Automatisierung. Aufgrund dieser Vorteile steigt die Anwendung von Servopressen gegenüber konventionellen mechanischen und hydraulischen Pressen. [3]

Bei Servopressen mit Spindelantrieb steht im Gegensatz zu Servopressen mit Exzenterantrieb die Nennkraft über den gesamten Stößelhub zur Verfügung. Damit entfallen weitere Beschränkungen, da die benötigte Prozesskraft während des gesamten Hubes vollständig aufgebracht werden kann. Darüber hinaus erlaubt die in Servospindelpressen standardmäßig integrierte Messtechnik eine besonders vielseitige und genaue Steuerung und Überwachung der Kräfte und Wege. Allerdings erreichen Servospindelpressen geringere Nennkräfte und unterliegen durchlaufenden Exzenterpressen in den meisten Fällen bei den erreichbaren Hubzahlen. Um dies zu kompensie-

ren, bietet es sich an, mehrere Servospindelantriebe pro Stößel in einer Presse synchron zu fahren. Dadurch lassen sich die Kräfte addieren und bei gleichbleibender Leistungsaufnahme die erreichbaren Beschleunigungen erhöhen. Unter Verwendung von prozessangepassten Stößelbewegungsprofilen und der gesteigerten Dynamik des mehrachsigen Antriebes können die höheren Hubzahlen von konventionellen Exzenterpressen bezüglich der Ausbringung relativiert werden. Aufgrund der begrenzten Nennkraft werden Servospindelpressen in der Umformtechnik hauptsächlich für die Fertigung kleiner Bauteile eingesetzt.

Nicht nur die Möglichkeiten der Servoantriebe ändern Sichtweisen in der Umformtechnik. Zur Umsetzung des Zukunftsprojektes Industrie 4.0 des BMBF zur Informatisierung der Fertigungstechnik muss eine Presse mit weiteren Produktionssystemen kommunizieren und interagieren können. Zukünftige Pressen sind mit den umgebenden Systemen nicht mehr nur über den Materialfluss verknüpft, sie lassen sich in den Informationsfluss der Wertschöpfungskette einbinden. Für diesen Zweck verarbeiten sie sowohl eigene Daten als auch solche aus vor- und nachgelagerten Prozessen. Mithilfe einer Datenauswertung werden die Prozesssicherheit und die Produktqualität gesteigert. [4]

Komplexe Bauteilgestaltungen, hohe Produktvielfalt und kleiner werdende Losgrößen sowie neue, schwerer umformbare Werkstoffe erfordern hochspezialisierte Umformmaschinen, die sich an den jeweiligen Fertigungsprozess anpassen lassen. Die steigenden Maschinenkosten und der Umrüstaufwand bei Auftragswechseln stehen jedoch der Fertigung von immer kleiner werdenden Losgrößen entgegen. Kurze Werkzeugwechselzeiten sind für eine wirtschaftliche Fertigung kleiner Losgrößen mit häufigen Werkzeugwechseln erforderlich.

Schwankende Einflussfaktoren wie Preise, Qualitäten und Verfügbarkeiten von Roh- und Betriebsstoffen erschweren die Situation zusätzlich. Um wirtschaftlich fertigen zu können, müssen die Produktionssysteme wandlungsfähig werden. Wandlungsfähige Produktionssysteme können an schwankende Einflussfaktoren angepasst werden, sie reagieren demnach auf den Wandel der Einflussfaktoren. Beispiele dafür sind im Bereich der Umformmaschinen der Austausch von Maschinenkomponenten oder die Änderung der Abfolge von Teilprozessen. [2]

Gefragt sind Pressen, die unter den geschilderten Voraussetzungen auch zukünftig effizient und wirtschaftlich fertigen können. Die Entwicklung eines neuartigen Pressensystems, welches diese Anforderungen erfüllen soll, wird im Rahmen dieser Arbeit beschrieben.

2 Stand der Erkenntnisse

Der erste Abschnitt des folgenden Kapitels zeigt einen Überblick über den Stand der Wissenschaft und Technik von Umformmaschinen, insbesondere von Servospindelpressen. Dadurch wird die Motivation für die Entwicklung eines neuartigen Pressensystems herausgestellt. Außerdem werden Grundlagen für den Aufbau und die Konstruktion des Pressensystems erarbeitet. Im zweiten Abschnitt des Kapitels wird anschließend die Konstruktionsmethodik beschrieben, wobei vor allem die in dieser Arbeit für die Entwicklung des Pressensystems verwendeten Methoden erläutert werden.

2.1 Pressentechnik

2.1.1 Allgemeine Einsatzgebiete von Pressen

Pressen gehören zu den Umformmaschinen, sie fertigen Teile durch eine – in der Regel geradlinig translatorische¹ – Relativbewegung ihrer Werkzeuge [5 S. 46]. Dabei stellen Pressen die für den Prozess benötigte Wirkenergie bereit, die eigentliche Materialbearbeitung geschieht in den Werkzeugen. Pressen werden zur Metallbearbeitung eingesetzt, außerdem in der Textil-, Holz-, Keramik-, Glas- und Kunststoff-Fertigung, bei Werkstoffverbunden und Faserverbundwerkstoffen.

Pressen ändern die Form von Bauteilen durch Umformen nach DIN 8582 [6] sowie Zerteilen nach DIN 8588 [7] und schaffen örtlichen Zusammenhang zwischen Bauteilen durch Fügen nach DIN 8593-0 [8]. Trennende Verfahren sind in der Hauptsache spanlose Zerteilprozesse, nur das Nachschneiden bzw. -schaben ist ein spanendes Trennverfahren [9 S. 1] [10 S. 712]. Trotz der Spanbildung wird das Nachschneiden nach DIN 8588 [7] als spezielles Schneidverfahren eingeordnet. Verschiedene Umform-, Schneid- und Fügeverfahren können in Pressen zusammengelegt werden, üblich sind z. B. das kombinierte Streck- und Tiefziehen beim Umformen nichtrotations-symmetrischer Bauteile [11 S. 22]. DEMMEL u. a. [10 S. 681] verwenden den Begriff Stanzen, um die Kombination von einfachem Scherschneiden mit Umform- und Biegeprozessen in Folgeverbundwerkzeugen zu benennen. In der DIN 9870-1 [12 S. 1] beinhaltet das Stanzen neben Schneid- und Umformverfahren zusätzlich auch Fügeprozesse innerhalb eines Pressenhubes. Auch HELLWIG & KOLBE [13 S. 7] erweitern den Begriff des Stanzens durch Füge-, Schweiß- und Gewinde erzeugende Prozesse zusätzlich zu den Schneid- und Umformverfahren.

¹ Eine Ausnahme bilden Taumelpressen und Freiformmaschinen mit nicht geradliniger Relativbewegung der Werkzeuge [48 S. 12].

Im Folgenden wird sich der Definition des Stanzens nach DEMMEL u. a. angeschlossen, wonach unter Stanzen nur das Trennen und Umformen während eines Hubes verstanden wird. Durch Verfahrenskombinationen und der Integration weiterer Fertigungsmethoden lässt sich mit Pressen ein großes Bauteilspektrum bis hin zur Fertigung von Baugruppen abbilden. Eine Nebenfunktion als Zuhalteeinrichtung erfüllen Pressen beim Spritzgießen und beim Hydro-Umformen [14]. Außerdem werden Pressen zum Verdichten in der Pulvermetallurgie eingesetzt.

2.1.2 Einteilung von Pressen

Im Allgemeinen werden Umformmaschinen nach ihren charakteristischen Kenngrößen in arbeits-, weg- und kraftgebundene Maschinen unterschieden [10] [15] [16] [17]. Zudem existieren Kombinationen aus verschiedenen Wirkprinzipien von Pressenantrieben. Stand der Technik sind z. B. mechanisch-hydraulische Hybridpressen, bei denen hydraulische Zylinder den Exzenter- bzw. Kurbelantrieb ergänzen [11 S. 203] [18 S. 393] und pneumohydraulische Pressen. Einen Vergleich der arbeits-, weg- und kraftgebundenen Umformmaschinen zeigt Abbildung 2.1.

Arbeits- oder energiegebundene Umformmaschinen bauen die zur Bearbeitung notwendige Energie für jeden Hub neu auf. Für arbeitsgebundene Umformmaschinen ist nicht die Kraft kennzeichnend, da diese von der Art des Werkstückes und vom Verformungsweg abhängt. Arbeitsgebundene Pressen formen in der Maschine gespeicherte mechanische Energie in kinetische Energie um. In Hämmern wird potenzielle Energie durch das Anheben des Stößels gespeichert, Schwungrad-Spindelpressen speichern Energie in der Drehbewegung des Schwungrades. Die gespeicherte Energie wird für die Bearbeitung des Werkstückes vollständig umgesetzt. [10 S. 298] [18 S. 296]

Weggebundene Pressen sind durch eine Hebelkinematik gekennzeichnet. Vorwiegend werden Koppelgetriebe als Exzenter-, Kurbel- oder Gelenkgetriebe ausgeführt, seltener sind Kurvengetriebe und sonstige Varianten. Wegen der geringeren erreichbaren Kräfte werden weggebundene Pressen mit Kurvengetrieben vorrangig für die Fertigung von Mikro-Bauteilen gebaut [19 S. 16]. Die Stößelkraft weggebundener Pressen ist abhängig vom Stößelhub, sie folgt dem in der Hebelkinematik eingprägten Kraft-Weg-Verlauf. Zur Anpassung des Stößelbewegungsprofils können die Kurbelgetriebe durch zusätzliche Getriebe wie Kniehebel [18 S. 349] oder Keile ergänzt werden. Die daraus entstehenden Kniehebel- und Keilpressen können statt durch einen Kurbeltrieb auch durch Hydraulikzylinder oder Spindeln angetrieben werden. Weggebundene Pressen werden auch als mechanische Pressen bezeichnet [10 S. 519] [11 S. 38] [17 S. T58].

In kraftgebundenen Pressen steht über den gesamten Stößelhub die Nennkraft zur Verfügung. Zu dieser Kategorie zählen u. a. Hydraulik- und Pneumatikpressen sowie schwungradlose Spindelpressen. Außerdem arbeiten die weniger verbreiteten Hydro-Pneumatik-Pressen [19 S. 13], Lineararmotorpressen, Zahnstangenpressen [20] und Piezopressen [21 S. 180] kraftgebunden. Eine Lineararmotorpresse benötigt eine sehr hohe Anschlussleistung und erreicht nur verhältnismäßig geringe Kräfte [22] [23]. Piezopressen haben eine extrem geringe Hubhöhe von etwa einem Promille der Höhe des Piezoelementes, sie können nur in der Mikrofertigung eingesetzt werden [24 S. 312f].

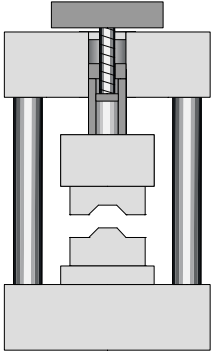
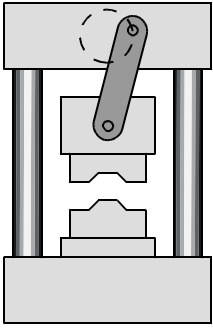
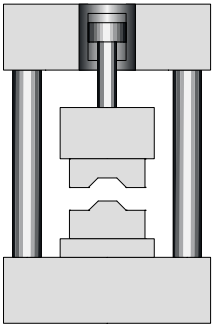
	Arbeitsgebundene Umformmaschinen	Weggebundene Pressen	Kraftgebundene Pressen
			
Kennzeichen	Die mechanische Energie ist zu Beginn des Umformprozesses in der Presse gespeichert.	Die Stößelkraft ist abhängig vom Stößelhub.	Die Stößelkraft ist unabhängig vom Stößelhub.
Ausführungen	<ul style="list-style-type: none"> • Hämmer • Spindelpressen mit Schwungrad 	<ul style="list-style-type: none"> • Konventionelle Kurbel- und Exzenterpressen • Kniehebelpressen • Pressen mit Gelenk- und Kurvengetrieben • Keiltriebpresen • Pressen mit Raumlänkerantrieb [5 S. 81] 	<ul style="list-style-type: none"> • Hydraulikpressen • Pneumatikpressen • Schwungradlose Spindelpresen • Zahnstangenpressen • Piezopresen • Linearmotorpressen
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Einfacher, kostengünstiger Aufbau • Mehrfachschläge möglich • Hohe Wirkungsgrade 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Hubzahlen bei hohen Kräften • Hohe Automatisierungsgrade 	<ul style="list-style-type: none"> • Stößelkraft über gesamten Stößelhub konstant • Kraft-Weg-Verlauf variabel einstellbar • Hubhöhe variabel • Hohe Automatisierungsgrade
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Lärm und Erschütterung • Mäßig genaue Regelung • Geringe Hubzahlen 	<ul style="list-style-type: none"> • Stößelkraft nicht über gesamten Stößelhub konstant • Stößelbewegungsprofil im Allgemeinen fest 	<ul style="list-style-type: none"> • Maschinenabhängig meist geringere Hubzahlen • Spindelpresen nur mit geringeren Kräften wirtschaftlich sinnvoll
Einsatz	<ul style="list-style-type: none"> • Massivumformung • Schmieden • Prägen 	<ul style="list-style-type: none"> • Massiv- und Blechumformung • Kalt- und Warmumformung 	<ul style="list-style-type: none"> • Massiv- und Blechumformung • Montage • Tryout-Betrieb

Abbildung 2.1: Einteilung von Umformmaschinen nach dem Wirkprinzip

Pressen können neben ihrem Wirk- und Antriebsprinzip auch nach weiteren Kriterien geordnet werden. Eine Möglichkeit ist die Gruppierung von Pressen nach ihrer Einsatzvielfalt. In dieser Hinsicht unterscheidet SCHULER [11 S. 33] zwischen spezialisierten Anlagen und Universalanlagen. Spezialisierte Anlagen sind im Gegensatz zu Universalanlagen nur auf ein kleines Teilespektrum beschränkt. Durch die Fokussierung auf wenige, meist stark angepasste Fertigungsprozesse und die dazugehörigen Werkzeuge werden sie für Großserien mit hoher Ausbringung eingesetzt. Der Einsatzbereich hinsichtlich der Fertigungsverfahren und Pressenwerkzeuge ist bei den Universalanlagen größer. Da die einzelnen Fertigungsverfahren in ihren Prozessparametern oft stark voneinander abweichen, ist die Ausbringung wegen der erforderlichen Kompromisse im Allgemeinen geringer als bei spezialisierten Pressen.

Neben dem Aspekt der Einsatzvielfalt können Pressen in Maschinen zur Massiv- bzw. Blechumformung eingeteilt werden. Die Massivumformung ist durch räumlich zu beschreibende Rohteile gekennzeichnet, die unter teilweise großer Querschnitts- und dadurch auch Wanddickenänderung dreidimensional umgeformt werden. Im Gegensatz dazu werden in der Blechumformung aus flächenhaften Rohteilen Hohlteile bei annäherungsweise ausbleibender Wanddickenänderung gefertigt [10 S. 12]. Für das Tiefziehen von Blechen sind oft mehrfachwirkende Tiefziehpressen erforderlich, die mit entsprechenden Zieheinrichtungen ausgerüstet sind. Bei einfachwirkenden Pressen, die für kleine Teile angewendet werden, ist das Werkzeug mit einer Zieheinrichtung versehen. Innerhalb der Blechbearbeitung werden vor allem weg- und kraftgebundene Pressen eingesetzt, Schmiedearbeiten werden meist auf arbeitsgebundenen Umformmaschinen oder kraftgebundenen Pressen durchgeführt.

Eine weitere Kategorisierung von Pressen kann durch die Betrachtung des Automatisierungsgrades vorgenommen werden. HESSE [25 S. 115] gibt die in Abbildung 2.2 zusammengefasste Einteilung von Pressen nach dem Automatisierungsgrad vor. Diese entspricht der Einteilung von Werkzeugmaschinen nach WECK [5 S. 17f].

Automatisierungsgrad	Kennzeichen/Ausführung
Nicht automatisierte Einzelmaschinen	<ul style="list-style-type: none"> • Pressen mit Handbeschickung
Automatisierte Einzelmaschinen	<ul style="list-style-type: none"> • Pressen für die Massenfertigung
Flexibel automatisierte Maschinen	<ul style="list-style-type: none"> • Mehr-Verfahren-Maschinen mit automatisiertem Werkzeugwechsel und -speicher • Gegebenenfalls automatisierter Werkstückfluss (Blechbearbeitungszentren) und weitere Kontroll- und Überwachungssysteme (flexible Fertigungszellen)
Mehrstufenmaschinen	<ul style="list-style-type: none"> • Innere Verkettung von Arbeitsstationen • Mehrstufenpressen
Maschinenfließreihen	<ul style="list-style-type: none"> • Äußere Verkettung von Maschinen • Pressenlinien²

Abbildung 2.2: Einteilung von Pressen nach dem Automatisierungsgrad nach HESSE [25 S. 115]

Maschinen im Allgemeinen erzeugen die für den Prozess notwendigen Bewegungen und Kräfte, sie können durch eine entsprechende Steuerung automatisiert werden. Eine Maschine zur Blechbearbeitung mit automatisiertem Werkzeugwechsel und -speicher wird als Blechbearbeitungszentrum bezeichnet. Dieses kann durch einen automatisierten Werkstückfluss ergänzt sein. Blechbearbeitungszentren werden durch Werkzeugüberwachung, Bearbeitungs- und Qualitätskontrollsysteme zu flexiblen Fertigungszellen erweitert. Werden mehrere Bearbeitungsstationen miteinander verkettet, so entstehen Mehrstufenmaschinen mit innerer Verkettung bzw. Maschinenfließreihen mit äußerer Verkettung. Mehrstufenpressen können sowohl mit einem als auch mit mehreren Stößeln arbeiten. [25 S. 185ff]

Verkettete Pressen für die Blechumformung werden nach KRETH u. a. [10 S. 524] in Folgeverbundpressen, Transferpressen und Pressenlinien unterschieden. Folgeverbundpressen treiben mit einem Hauptantrieb über einen oder mehrere Stößel aufeinanderfolgende Werkzeugstufen an. Der Teiletransport zwischen den Werkzeugstufen erfolgt durch den Bandvorschub, erst in der letzten Stufe wird das Fertigteil vom Band getrennt. Streifenheber dienen dem Anheben des Blechbandes in Folgewerkzeugen, beim Öffnen des Werkzeuges drücken Federn das Band aus den Matrizen in Richtung OT. Folgeverbundpressen fertigen vorrangig kleine bis mittelgroße Teile mit geringer bis mittlerer Komplexität und Ziehtiefe in mittleren bis sehr großen Stückzahlen. Der schnelle Teiletransport im Blechband ermöglicht eine hohe Ausbringung und kompakte

² Pressenlinien werden auch als Pressenstraßen bezeichnet.

und daher kostengünstige Werkzeuge, außerdem entfallen die Kosten für Anschaffung, Steuerung und Betrieb des Transfersystems. Erfordern die Bauteile höhere oder ungleichmäßige Ziehtiefen, komplexe Schieber oder Schwenklagen, so werden Transferpressen eingesetzt. Diese treiben mit meist einem Stößel mehrere Werkzeugstufen an. Innerhalb der Werkzeugstufen werden die Teile von einem mit dem Stößel synchronisierten Transfersystem transportiert. Transferpressen werden mit Platinen beschickt, die in einer vorgeschalteten Anlage oder in der ersten Stufe der Transferpresse geschnitten werden. Für die Fertigung von Großteilen wie Automobiltüren oder -bodenblechen werden Großteiltransferpressen eingesetzt. In diesen treibt ein Hauptantrieb mehrere Stößel parallel an. Großflächige Teile mit geringer Bauteil-Steifigkeit erfordern ein Teiletransfersystem mit Vakuumsaugern und für jede Werkzeugstufe separat geführte Pressenstößel. Sie werden daher als Saugertransferpressen bezeichnet. Transferpressen entkoppeln die Stufen durch den Teiletransfer voneinander und ermöglichen im Vergleich zu Folgeverbundpressen größere Ziehtiefen und größere Bauräume für Schieber und Abfallentsorgung. Dies erweitert die Grenzen in der Gestaltung des Prozesses, der Werkzeuge und der Bauteilgeometrien. Obendrein wird die Flexibilität von Transferpressen durch Zusatzeinrichtungen wie separate Zieheinrichtungen oder Stößel mit Gegenhalter gesteigert. BIRKERT u. a. [26 S. 322f] benennen die auf diese Art erweiterten Transferpressen als Stufenpressen. Für Stufenpressen kennzeichnend ist die Möglichkeit, einzelne Stufen individuell anzupassen, beispielsweise durch Zieheinrichtungen im Pressentisch oder Gegenhalte- und Auswerfereinrichtungen im Stößel. Häufig werden in der Literatur die Begriffe Stufenpresse, Mehrstufenpresse und Transferpresse synonym verwendet. Alternativ werden für großflächige Bauteile in Reihe angeordnete Einzelpressen mit jeweils eigenem Antrieb eingesetzt. Diese Pressenverbunde werden als Pressenlinien bezeichnet. Für den Teiletransport zwischen den Einzelpressen werden u. a. Schwingarm- und CNC-Feeder und Roboter eingesetzt. Prinzipiell ist auch ein manueller Teiletransport möglich. In Pressenlinien kommen sowohl kraft- als auch weggebundene Pressen zum Einsatz. Neuere Pressenlinien arbeiten mit weggebundenen Servopressen, um die Ausbringung, die Liniensteuerung und den Energieverbrauch zu verbessern und die Integration von zusätzlichen Fertigungsprozessen zu ermöglichen. Das Stößelbewegungsprofil jeder Presse in der Linie kann für jedes Bauteil individuell an den Umformprozess, das Werkzeug und die Automatisierung angepasst werden. Der Prozess kann flexibel eingestellt werden und ist nicht, wie bei konventionellen Pressen, von den Restriktionen des Antriebes abhängig. [10 S. 525f] [11 S. 227] Neben den bisher genannten Einteilungen können Pressen auch nach weiteren Kriterien unterschieden werden. Abbildung 2.3 zeigt eine Übersicht über die bisher aufgeführten Unterscheidungsmerkmale und ergänzt bislang ungenannte Kriterien.

Unterscheidungskriterium	Beispiele		
Antriebsprinzip	• Exzenterpresse • Spindelpresse	• Kurbelpresse • Hydraulikpresse	• Kniehebelpresse • Servopresse
Anzahl der Krafteinleitungspunkte	• Einpunktpresse	• Zweipunktpresse	• Vierpunktpresse
Automatisierungsgrad	• Nichtautomatisierte Presse mit Handbeschickung • Mehrstufenpresse • Pressenlinie		
Dimensionalität der Rohteile	• Presse für Blechumformung • Presse für Massivumformung		
Einsatz	• Presse für Serienfertigung • Tryout-Presse		
Einsatzvielfalt	• Universalanlage • Spezialisierte Anlage		
Fertigungsverfahren	• Stanzpresse • Montagepresse	• Schmiedepresse • Tiefziehpresse	• Schneidpresse
Gestelltyp	• C-Gestell-Presse	• O-Gestell-Presse	• E-Gestell-Presse
Lage der Presse im Raum	• Stehende Presse	• Schräge Presse	• Liegende Presse
Lage des Antriebes	• Oberhalb des WKZ • Unterhalb des WKZ		
Teilegröße	• Großteilpresse	• Kleinteilpresse	• Mikropresse
Temperatur	• Presse für Kaltumformung	• Presse für Halbwarmumformung	• Presse für Warmumformung
Verbundart	• Einzelpresse	• Mehrstufenpresse	• Pressenlinie
Werkstückwerkstoff	• CFK-Presse • Sinterpresse	• Presse für Stahlbandbearbeitung	• Presse für Holzverbunde
Wirkprinzip	• Arbeitsgebundene Presse	• Weggebundene Presse	• Kraftgebundene Presse
Wirkungsweise [5 S. 74] [27 S. 99]	• Einfachwirkende Presse	• Zweifachwirkende Presse	• Mehrfachwirkende Presse

Abbildung 2.3: Mögliche Unterscheidungskriterien von Pressen

Um quantitative Aussagen über Umformmaschinen treffen zu können und die Maschinen und deren Prozesseignung und Wirtschaftlichkeit miteinander zu vergleichen, bieten sich die in Abbildung 2.4 zusammengefassten Kenngrößen an [10 S. 295ff] [15 S. 875] [19 S. 5] [25 S. 27ff] [28] [29]. Zahlenwerte der geometrischen Genauigkeitskenngrößen einer unbelasteten Maschine finden sich in der DIN 8650 [30] und DIN 8651 [31]. Die Kennwerte belasteter me-

chanischer und hydraulischer Pressen und deren Ermittlung sind in DIN 55189-1 [32], DIN 55189-2 [33] und VDI 3193-2 [34] beschrieben. Verschiedene Parameter wie Nennkraft, Abmessungen der Stößel- und Aufspannplatten und der Stößelhub für bestimmte Ein- und Zweiständerpressen sind durch die DIN 55181 [35], DIN 55184 [36] und DIN 55185 [37] genormt. DÖGE & BEHRENS [15 S. 890ff] beschreiben bislang ungenormte Messverfahren zur Bestimmung der Steifigkeit von dynamisch belasteten Schnellläuferpressen.

Energetische und kinematische Kenngrößen		
Arbeitsgebundene Umformmaschinen	Weggebundene Pressen	Kraftgebundene Pressen
<ul style="list-style-type: none">• Arbeitsvermögen• Nennkraft (bei Spindelpressen)• Geschwindigkeit• Maschinensteife• Wirkungsgrad	<ul style="list-style-type: none">• Arbeitsvermögen• Nennkraft• Drehmoment• Geschwindigkeit• Maschinensteife• Wirkungsgrad	<ul style="list-style-type: none">• Nennkraft• Geschwindigkeit• Maschinensteife• Wirkungsgrad
Geometrische Kenngrößen		
<ul style="list-style-type: none">• Stößelhub (Hubweg), bei weggebundenen Pressen gegebenenfalls Hubverstellung• Arbeitsweg• Abmessungen der Presse, insbesondere des Werkzeugraumes und der Einbauräume		
Zeitkenngrößen		
<ul style="list-style-type: none">• Hubzahl bei Pressen bzw. Schlagzahl bei Hämmern• Stößelgeschwindigkeit• Druckberührdauer• Schaltzahl bei Einzelhubbetrieb• Umrüstdauer		
Genauigkeitskenngrößen		
Genauigkeit der unbelasteten Maschine	Genauigkeit der belasteten Maschine	
<ul style="list-style-type: none">• Ebenheiten und Parallelität von Stößelfläche und Aufspannplatte• Rechtwinkligkeit der Bohrung des Einspannzapfens zur Stößelfläche• Rechtwinkligkeit zwischen bewegtem Stößel und Aufspannplatte	<ul style="list-style-type: none">• Vertikale Auffederung unter mittiger Belastung in Pressrichtung• Kippung unter außermittiger Belastung• Horizontaler Versatz unter außermittiger Belastung	
Bedingungen am Arbeitsplatz		
<ul style="list-style-type: none">• Aufstellbedingungen: Energieanschlüsse, Fundamentierung, Außenmaße• Geräuschpegel: Leerlauf-, Schalt- und Lastgeräusche		

Abbildung 2.4: Pressenkenngrößen nach DÖGE & BEHRENS [15 S. 875] und weiteren

Die Entwicklung der Pressentechnologie ist nicht abgeschlossen, es werden weitere, neuartige Pressen entstehen. So wird der anhaltende Trend zu einem immer höheren Automatisierungsgrad neue Anlagenkonzepte hervorbringen. Die stetige Entwicklung der Pressenautomatisierung, beginnend bei händischer Beladung der Pressen über die Teilautomatisierung von Pressenlinien in den 1950er Jahren durch die Eiserne Hand, gefolgt von Langschiensystemen, Feedern und Robotern bis hin zu den Kompakt-Großteiltransferpressen mit unabhängig steuerbarem Sauggreifertransfer der 2000er Jahre zeigt, dass auch in Zukunft neuartige Pressetypen zu erwarten sind [38].

2.1.3 Arbeitsbereiche verschiedener Pressen

Typische Arbeitsbereiche verschiedener Pressenarten sind in Abbildung 2.5 zusammengefasst. Die Hubzahl aller Pressen hängt von der Leistung und dem Wirkungsgrad des Pressenantriebes sowie dem Stößelhub ab. In Folgeverbundpressen, Mehrstufenpressen und Pressenlinien wird die Hubzahl zusätzlich von der Vorschubgeschwindigkeit des Teiletransportes beeinflusst. Bis zu 2000 Hub in der Minute bei einer Kraft von 200 kN erreichen schnelllaufende Exzenterpressen [39]. Diese werden aufgrund der innerhalb der Pressen integrierten Vorschubapparate auch als (Hochleistungs-)Stanzautomaten bezeichnet [10 S. 727] [13 S. 332]. Zur Herstellung von Großrohren für Pipelines werden hydraulische Pressen mit einer Nennkraft von 720 000 kN genutzt [40]. Schwungradlose Servospindelpressen erreichen nur niedrige Nennkräfte bei hohen Hubzahlen. Um die Kraftbereiche zu erhöhen, bietet es sich an, mehrere synchron angetriebene Spindeln gleichzeitig zu fahren, sodass deren Kräfte addiert werden. In Servospindelpressen haben die Hubhöhe und die Beschleunigungen wegen der notwendigen Drehrichtungswechsel einen besonders hohen Einfluss auf die Hubzahlen. Demgegenüber ist bei im Durchlaufbetrieb arbeitenden Exzenterpressen die Drehzahl des Antriebes entscheidend. Servoexzenterpressen können in einigen Fällen durch Drehrichtungswechsel des Motors im Pendelhubbetrieb höhere Hubzahlen als bei Vollhubbetrieb erreichen. [5 S. 63 – 86] [10 S. 302] [27 S. 95] [41] [42]

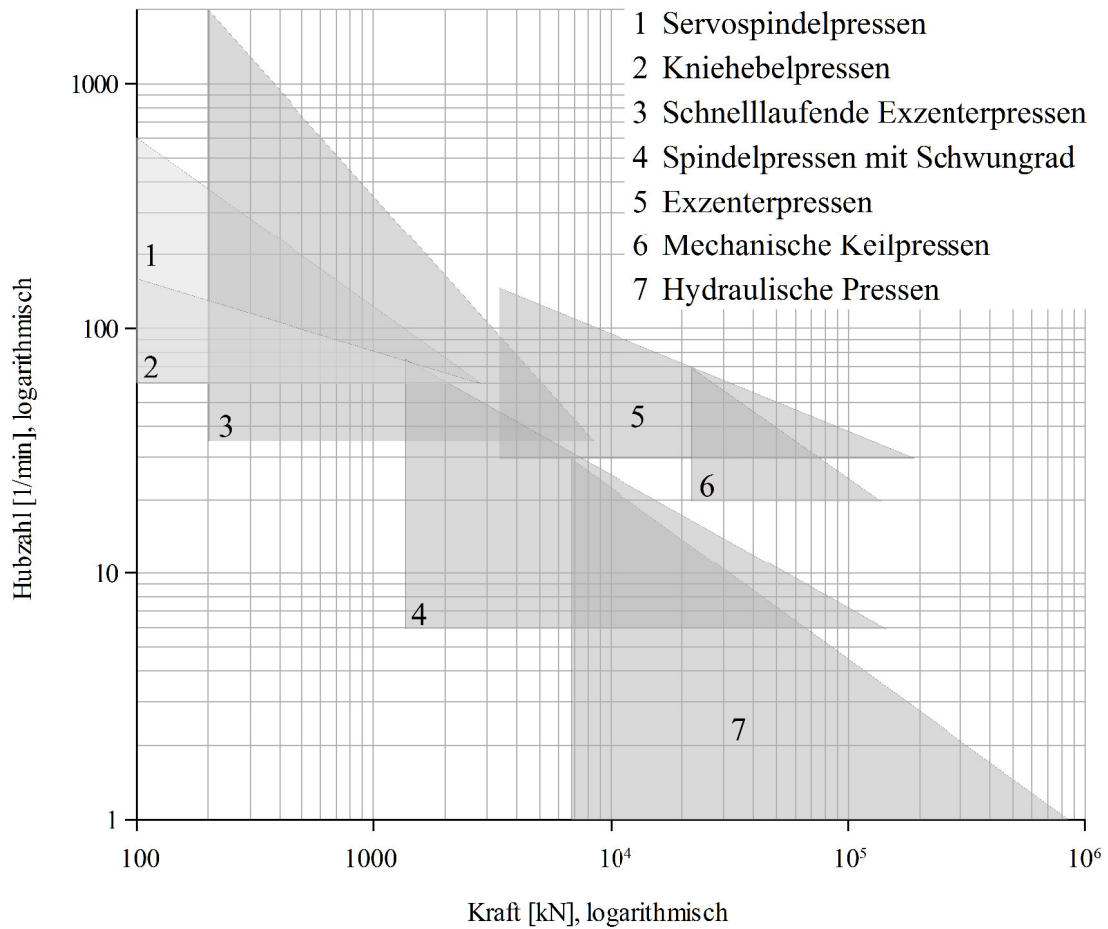


Abbildung 2.5: Typische Arbeitsbereiche verschiedener Pressen

2.1.4 Servopressen

Die Vorteile von weggebundenen und kraftgebundenen Pressen werden in den servomotorisch getriebenen Pressen zusammengeführt. Servopressen verbinden die Produktivität mechanischer Pressen mit der Flexibilität von Hydraulikpressen [43]. Zu diesen bietet NEUGEBAUER folgende Arbeitsdefinition an:

„Servopressen sind Umformmaschinen, die mittels geregelter Antriebe ein definiertes Weg-Zeit-Verhalten an der Wirkstelle realisieren können.“ [3 S. 404]

Alle Elektromotoren mit Positionssteuerung und -regelung können als Servomotoren bezeichnet werden [10 S. 520f]. Servomotoren ermöglichen hochdynamische und präzise steuer- und regelbare Antriebe, außerdem sind sie in vielen Ausführungen erprobt und verfügbar. Daher werden Servomotoren im Pressenbau sowohl als Hauptantriebe als auch in Nebenantrieben wie in Transportsystemen [13 S. 344] [15] oder Zuführsystemen [11 S. 518] genutzt. Servopressen werden als Exzenterpressen, Pressen mit Gelenkantrieb, Exzenterpressen mit Kniehebel und als schwungradlose Spindelpressen, vereinzelt auch als Zahnstangenpressen [20], ausgeführt. Innerhalb der Montagetechnik sind Servospindelpressen sehr verbreitet, in diesem Bereich werden sie üblicherweise als elektromechanische Pressen bezeichnet. Der wichtigste Vorteil aller Servopressen ist die – in den Grenzen des jeweiligen Pressenantriebes – Möglichkeit zur flexiblen und genauen Anpassung des Stößelbewegungsprofils. So können beispielsweise innerhalb eines Hubes Umformprozesse verlangsamt gefahren werden und Rückhubzeiten verkürzt werden. Am Vergleich der Bewegungsabläufe einer konventionell angetriebenen Exzenterpresse mit einer Servoexzenterpresse nach KRETH u. a. [10 S. 522] zeigt Abbildung 2.6 die Möglichkeiten der Servotechnologie.

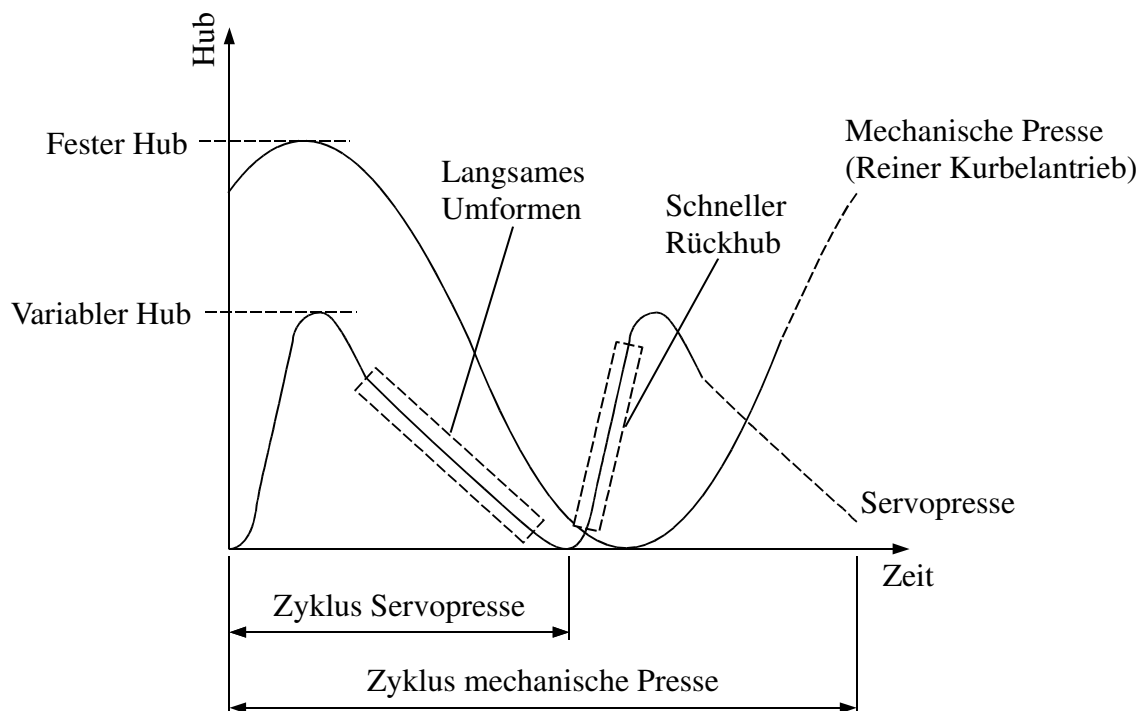


Abbildung 2.6: Bewegungsablauf einer mechanischen Presse und einer Servopresse nach KRETH u. a. [10 S. 522]

Die Geschwindigkeit des Servopressen-Stößels ist einstellbar, sodass die Umformphase verlangsamt, die Rückhubphase hingegen beschleunigt werden kann. Bei Servoexzenterpressen ist der Betrieb im Pendelhub möglich, wodurch auch hier die Hubhöhe flexibel anpassbar ist. Es entfallen die Verstellexzenter für die Hubverstellung und die zusätzlichen Verstellspindeln für die Stößelverstellung einer konventionellen Exzenterpresse im Durchlaufbetrieb. Durch die Anpassung von Geschwindigkeit und Stößelhub kann die Zykluszeit in einigen Fällen um 10 bis 50 % verringert werden. [10 S. 521] Die Ausbringungssteigerung an Beispielen aus der Produktionspraxis erläutern HOFELE [44] und PAUL & FRIELINGHAUS [45]. In den Untersuchungen von HOFELE konnten die Zykluszeiten auf Servopressen im Vergleich zu konventionellen Pressen um 25 bis 50 % gesenkt werden. PAUL & FRIELINGHAUS nennen im selben Zusammenhang Beispiele mit Zykluszeitverkürzungen von 20 bis 46 %. Servopressen bieten neben kürzeren Zykluszeiten einen geringeren Werkzeug- und Führungsverleiß sowie eine Minderung der Lärmbelastung. Darüber hinaus können Prozesse an wechselnde Umgebungseinflüsse und Prozessparameter einfacher angepasst werden und zusätzliche Teilprozesse in den Fertigungsablauf integriert werden. Außerdem entfallen Schwungräder und die dazugehörigen wartungsanfälligen Bremsen und Kupplungen. [10 S. 521] [46]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Servopressen die Flexibilität der hydraulischen Pressen mit der Produktivität mechanischer Pressen vereinen. Der Pressenantrieb einer Servopresse wird überwiegend sowohl als Exzenter als auch als Spindeltrieb ausgeführt. In Abbildung 2.7 werden hydraulische Pressen, Servoexzenterpressen und Servospindelpressen miteinander verglichen.

	Hydraulikpresse	Servoexzenterpresse	Servospindelpresse
Antrieb	Eine Pumpe oder ein Speicher treibt einen hydraulischen Zylinder an.	Ein Servomotor treibt einen Exzenterantrieb an.	Ein Servomotor treibt eine Bewegungsspindel an.
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Kräfte erreichbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Geschwindigkeiten & hohe Kräfte • Hoher Wirkungsgrad • Hubanpassung durch Pendelhub • Rückspeisung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Stößelkraft unabhängig vom Stößelhub • Hohe Beschleunigungen & hoher Wirkungsgrad • Rückspeisung möglich • Antriebsachsen gut kombinierbar • Einfacher Aufbau
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Druckmedium notwendig • Geringe Geschwindigkeiten • Geringer Wirkungsgrad • Defekte oft schlecht detektierbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Stößelkraft abhängig vom Stößelhub • Geringere Beschleunigungen als Servospindelpressen • Querkraft durch Exzenter 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur mäßig hohe Kräfte pro Antriebsachse erreichbar
Einsatz	<ul style="list-style-type: none"> • Massiv- und Blechbearbeitung 	<ul style="list-style-type: none"> • Vorrangig Blechbearbeitung 	<ul style="list-style-type: none"> • Montage, Fügen, Prüfen • Stanzen

Abbildung 2.7: Vergleich verschiedener Pressen

Hydraulikpressen weisen sehr große Nennkräfte auf, diese stehen über den gesamten Stößelhub zur Verfügung. Demgegenüber steht die Erfordernis des Druckmediums und der hohe Energieverlust. Außerdem erlangen sie geringere Geschwindigkeiten und Beschleunigungen als servomotorisch angetriebene Pressen. Servoexzenterpressen erreichen im Durchlaufbetrieb bei gleichbleibender Drehrichtung höhere Geschwindigkeiten als Servospindelpressen. Bei diesen muss die Drehrichtung der Spindel während eines Hubes zweimal geändert werden. Allerdings lassen sich Spindelantriebe wegen ihrer weitaus geringeren Massenträgheit schneller als Exzenterantriebe beschleunigen. Mit geringem Aufwand können mehrere Servospindelantriebe zu einem gemeinsamen Antrieb kombiniert werden, sodass die erreichbare Gesamtkraft erhöht wird. Ebenso wie bei den Hydraulikpressen ist die Stößelkraft der Servospindelpressen unabhängig vom Stößelhub.

Es stellt sich die Frage nach der Einordnung von Servopressen. Einige Quellen ordnen Servopressen ohne Schwungmasse den kraftgebundenen Pressen zu [15 S. 713] [17 S. T64] [24 S. 312f]. Die Einordnung der Servopressen innerhalb der kraftgebundenen Umformmaschinen ist allerdings nicht eindeutig, so bemerken BIRKERT u. a. [26 S. 436f], dass sich Exzenterpressen

mit Servoantrieben wegen der Abhängigkeit ihrer Stößelkraft und -geschwindigkeit vom Drehwinkel der Antriebswelle neben den kraftgebundenen auch den weggebundenen Maschinen zuordnen lassen. Außerdem können sie den arbeitsgebundenen Maschinen zugeordnet werden, wenn sie über einen Energiespeicher verfügen. Da Servopressen sowohl weg-, kraft- und arbeitsgebunden betrieben werden können, schlägt WEGENER [47 S. 548] eine nicht weiter ausgeführte vierte Klassifizierung für Servopressen vor. KRETH u. a. [10 S. 520] ordnen Servopressen dem weg- und dem kraftgebundenen Arbeitsprinzip zu. Die Probleme bei der Einordnung der Servopressen erörtert SCHEITZA [48 S. 14ff] ausführlich. In dieser Quelle ist für die Abgrenzung von weg- und kraftgebundenen Pressen nicht der Kraftverlauf am Pressenstößel entscheidend, sondern der Zusammenhang zwischen Antriebs- und Abtriebskraft. Diese Betrachtungsweise führt zu einer Unterteilung in weg- und kraftgebundene Servopressen. Weggebundene Servopressen werden in direkt- oder schwungradgetriebene Servopressen unterteilt und diese jeweils in Servopressen mit Fest- oder Verstellhub. Kraftgebundene Servopressen seien durch den drehrichtungswechselnden Spindeltrieb ohne Schwungrad gekennzeichnet. Zahnstangenantriebe sind laut SCHEITZA wegen der kleineren Berührflächen technisch nicht nutzbringend.

Im Folgenden sollen die weg- und kraftgebundenen Pressen danach unterschieden werden, ob deren Stößelkraft abhängig vom Stößelhub ist, ohne den Zusammenhang zwischen Pressentrieb und Stößelkraft zu berücksichtigen. Servopressen werden in Abhängigkeit des Antriebsprinzips in weggebundene Servopressen und kraftgebundene Servopressen unterschieden. Ein Beispiel für weggebundene Servopressen ist die Servoexzenterpresse, als Beispiel für kraftgebundene Servopressen dient die direktangetriebene Servospindelpresse. Zwei Gründe sprechen gegen eine Eingliederung der Servopressen innerhalb der arbeitsgebundenen Umformmaschinen: Mögliche Energiespeicher von Servopressen arbeiten elektrisch und nicht mechanisch. Außerdem wird nicht die gesamte in der Maschine gespeicherte Energie in jedem Hub umgesetzt. Die Vielschichtigkeit der Wirkprinzipien der Servopressentechnik weist auf einen wichtigen Vorteil dieser Maschinenart hin. Servopressen sind vielseitig und vereinen positive Eigenschaften verschiedener Antriebsarten.

2.1.5 Einsatz von Servopressen in der Industrie und Forschung

Vor allem im deutschen und japanischen Pressenbau verbreiten sich seit Beginn der 1990er Jahre vermehrt Pressen mit Servoantrieb. Diese sind meist als Exzenterpressen für die Blechbearbeitung mit drehmomentstarken Torquemotoren ausgeführt. [49] [50 S. 19] [51] Derzeit ist der Einsatz von Servopressen beim Massivumformen Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsprojekten [52] [53]. In Abbildung 2.8 sind Hersteller weggebundener Servoexzenterpressen und kraftgebundener Servospindelpressen aufgelistet. Zusätzlich werden Servopressen von weiteren Produzenten, insbesondere Anlagenbauern, in Einzelfertigung gebaut. Ähnlich wie Servospindelpressen sind auch Elektrozyylinder aus Servomotoren und Spindeln aufgebaut. Sie werden allerdings nicht zur unmittelbaren Materialbearbeitung, sondern für Positionier- und Verstellaufgaben eingesetzt. Sie arbeiten meist weggeregelt, können aber teilweise auch durch Kraftsensorik ergänzt werden.

Servoexzenterpressen	Servospindelpressen
<ul style="list-style-type: none"> • Aida Engineering, Ltd. • Andritz Kaiser GmbH • Balconi Pressecentriche S. p. A. • Ebu Umformtechnik GmbH • Fagor Arrasate S. Coop. • Feintool International Holding AG • Haulick+Roos GmbH • Helmerding hiw Maschinen GmbH • Italwork Rolls S. r. l. • Komatsu Industries Corp. • M. E. Bruderer AG • Mabu-Pressen GmbH • Otto Bihler Maschinenfabrik GmbH & Co. KG • Raster Technology GmbH • Raster-Zeulenroda Werkzeugmaschinen GmbH • Schuler AG (Müller Weingarten AG, Beutler Nova AG) • Shieh Yih Machinery Industry Co., Ltd. (Seyi) • Simpac Inc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aldama GmbH (Synchropress) • Auloma Holding S. r. l. • B.I.W Group (Wildermann Messtechnik) • DSM Messtechnik GmbH • Egmont Wilhelm GmbH • EMG-Engineering & Maschinenbau GmbH • Ems-automation GmbH • Enomoto Machine Co., Ltd. • Estic Corporation • Heitkamp & Thumann KG (H&T) • Hoden Seimitsu Kako Kenkyusho Co., Ltd. (HSK) • IEF-Werner GmbH • Janome Sewing Machine Co., Ltd. • Kistler Holding AG (Dr. Staiger Mohilo & Co. GmbH) • Komatsu Industries Corp. • MC Machinery Systems, Inc. • Promess Gesellschaft für Montage- und Prüfsysteme mbH • S. Dunkes GmbH • Schmidt Technology GmbH • TOX Pressotechnik GmbH & Co. KG

Abbildung 2.8: Hersteller weg- und kraftgebundener Servopressen

Der in Servospindelpressen begrenzte Kraftbereich genügt den meisten Anwendungen in der Füge- und Montagetechnik, weitaus seltener wird dieser Pressentyp zum Stanzen eingesetzt. So existieren nur wenige Servospindelpressen zur Blechbearbeitung. Diese nutzen – oft als Torquemotor ausgeführte – Servomotoren in Verbindung mit Rollengewindetrieben RGT oder Kugelfewindetrieben KGT. Abbildung 2.9 listet die am Markt erhältlichen Servospindelpressen zur Blechbearbeitung auf.

Hersteller	Bezeichnung	Max. Kraft [kN]	Besonderheit
Aldama/H&T	Synchropress	300–4000	• Ziehender Antrieb
Dunkes/IWU	Servo-Spindelpresse	2000	• Schwingungsüberlagerung am Stößel möglich
H&T	MSP	320–2750	• Kippungsausgleich serienmäßig
H&T	SSP	1000–4000	• Kippungsausgleich serienmäßig
H&T	SSPT	2000–5000	• Kippungsausgleich optional
HSK	Divo	70 pro Stufe, 1–3 Stufen	• Mehrstufenpresse mit separaten Stößeln
HSK	ZENFormer	1000, 3000	• Zweifach wirkende Presse • Kippungsausgleich serienmäßig
HSK	ZENFormer nano	49	• Sehr kompakte Bauweise • Kippungsausgleich serienmäßig
Komatsu	HCP 3000	800	• Kippungsausgleich serienmäßig
M. E. Bruderer	ISP	1000–6300	• Kippungsausgleich serienmäßig
MC Machinery Systems	Diamond BB 4013	353	
Promess	Stanzpresse	100	

Abbildung 2.9: Servospindelpressen zur Blechbearbeitung

Die von FINUS [54] beschriebene Synchropress der Aldama GmbH und der H&T Produktionstechnologie GmbH ist eine Mehrstufenpresse mit einem Stößel. Dieser wird durch einen oder vier Torquemotoren, welche unter dem Tisch verbaut sind, über Rollengewindetribe ziehend angetrieben [55]. Mit einem drückenden Antrieb und RGT arbeiten die Multiservopresse MSP und die Servospindelpressen SSP und SSPT, die von H&T als Baureihen mit verschiedenen Kraftbereichen gebaut werden. Diese Servospindelpressen mit Oberantrieb erreichen Nennkräfte bis 5000 kN, sie ermöglichen – teilweise optional – eine Regelung der Stößelparallelität. [56] [57] HSK bietet mit dem ZENFormer eine zweifach wirkende Presse an [58].

Sehr kompakt baut die ZENFormer nano, sie presst mit maximal 49 kN [59]. Die Divo ist die einzige Mehrstufenpresse mit mehreren separat gesteuerten Stößeln. Sie ist aus Presseneinheiten aufgebaut, die aufeinanderfolgend angeordnet werden [60]. Sowohl die aufgeführten Pressen von HSK als auch Komatsus HCP 3000 [61] und MC Machinery Systems' Diamond BB 4013 [62] nutzen KGT. Im Vergleich zu RGT vertragen KGT bei gleicher Baugröße geringere Kräfte. Eine ständige Blechdickenmessung ist in der Diamond BB 4013 von MC Machinery Systems möglich [62]. In Bruderers ISP sind vier Wegmesssysteme so verbaut, dass kraft- und temperaturbedingte Stößelkippen ausgeglichen werden können [42]. Den aufgeführten Servospindelpressen ist gemeinsam, dass sie in einigen Bereichen nur beschränkt anpassungsfähig sind. Mit Ausnahme der Divo von HSK arbeiten die aufgeführten Pressen mit nur einem Stößel, wodurch eine Aufteilung des Prozesses auf voneinander unabhängig optimierbare Teilprozesse erschwert wird. Die Stößel der Divo lassen sich nicht miteinander synchronisieren, auch sind die Abstände zwischen den Stößeln nicht veränderbar, sodass eine Aufteilung des Prozesses und eine Optimierung der Teilprozesse weiterhin den Restriktionen der Maschine unterliegt.

Neben dem Einsatz in der Industrie werden Servopressen auch von Forschungseinrichtungen entwickelt und eingesetzt. In Kooperation des Fraunhofer-Institutes für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU mit dem Pressenhersteller Dunkes entstand eine Servospindelpresse, die eine Überlagerung von Schwingungen auf die Stößelbewegung zur Optimierung von Ziehprozessen erlaubt [63] [64]. Außerdem wurde von der IWU in Zusammenarbeit mit der Anchor Lamina GmbH ein wandelbarer Servopressenversuchsstand zur Untersuchung von verschiedenen Antrieben entwickelt [65]. Das Institut für Umformtechnik und Leichtbau IUL der TU Dortmund nutzt eine Servoexzenterpresse der Schuler GmbH für Untersuchungen hochfester metallischer Werkstoffe und Metall-Kunststoff-Verbunde [66]. Ebenfalls von Schuler ist die Servokniehebelpresse, welche vom Institut für Umformtechnik IFU der Universität Stuttgart für die Untersuchung von Werkzeugverschleiß genutzt wird [67]. Außerdem wird die Nutzung von Servopressen in der Massivumformung geprüft [53] [68 S. 17] und das Energiemanagement validiert [68 S. 37]. Ebenfalls unter Beteiligung des IWU in Zusammenarbeit mit Andritz Kaiser und Siemens wurde die Energieeffizienz von Servopressen untersucht [69]. Im Rahmen des Verbundprojektes Formäleon des Institutes für Produktionstechnik und Umformmaschinen PtU der TU Darmstadt in Kooperation mit mehreren Pressen- und Werkzeugherstellern wurden u. a. Prozessintegrationen in Umformwerkzeugen mit Servo-Linearantrieben, mehrachsige Servopressen und angepasste Stößelbewegungsprofile mit dem Ziel der wandlungsfähigen Blechumformung untersucht [70] [71].

2.1.6 Betrachtung von Servopressen im Rahmen der Industrie 4.0

Seit der Hannover Messe 2011 prägt das Schlagwort Industrie 4.0 die Diskussionen um die Produktionstechnik der Zukunft [72]. Unter dem Begriff Industrie 4.0 wird die vierte Stufe der industriellen Entwicklung, die Informatisierung der Fertigungstechnik, verstanden. Ziel ist die intelligente Fabrik³. Im hohen Maße werden Informationen aus Sensorik und Aktorik aller an der Wertschöpfung beteiligten Bereiche miteinander vernetzt. Diese starke Vernetzung soll zur Optimierung von Entwicklungs-, Produktions-, Logistik- und Serviceprozessen beitragen. Neben der Erneuerung von Technologien sollen durch die Maßnahmen der Industrie 4.0 auch Geschäftsmodelle und -prozesse umgestaltet werden. [73] In einer Umsetzungsstrategie der Verbände BITKOM, VDMA und ZVEI zur Industrie 4.0 wird diese folgendermaßen definiert:

„Der Begriff Industrie 4.0 steht für die vierte industrielle Revolution, einer neuen Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten. Dieser Zyklus orientiert sich an den zunehmend individualisierten Kundenwünschen und erstreckt sich von der Idee, dem Auftrag über die Entwicklung und Fertigung, die Auslieferung eines Produkts an den Endkunden bis hin zum Recycling, einschließlich der damit verbundenen Dienstleistungen.“ [74 S. 8]

Im Allgemeinen sollen die Effizienz und die Flexibilität gesteigert und Produkteinführungszeiten verkürzt werden, um auf dem internationalen Markt Wettbewerbsvorteile zu generieren. Die effektive Nutzung von Energie und Ressourcen wird dabei als wichtiger Wettbewerbsfaktor betrachtet. Eine gesteigerte Produktivität, individualisierte Massenfertigung und die Bedienung unbeständiger Märkte erfordern die Steigerung der Flexibilität in der Produktion. Dabei ermöglicht der hohe Vernetzungsgrad die Selbstorganisation der Produktionsmittel unter Rücksichtnahme auf die gesamte Wertschöpfungskette. Basierend auf den gesammelten Informationen wird der Produktionsablauf an die äußeren Bedingungen angepasst. [75 S. 2]

Die ansteigende Komplexität der Märkte, gemessen u. a. an der steigenden Variantenvielfalt bei sinkender Planungssicherheit bezüglich Produktionsmengen und immer kürzeren Lieferzeiten, verändert die Anforderungen an die heutige Produktionstechnik. Die innere Komplexität des Unternehmens muss an den Markt angepasst werden, ohne dabei an Effizienz zu verlieren. Dies führt dazu, dass sich produzierende Unternehmen zur intelligenten Fabrik entwickeln müssen, um am Markt zu bestehen. Eine intelligente Fabrik ist in der Lage, sich dezentral und in Echtzeit

³ Andere Bezeichnungen der intelligenten Fabrik sind Smart Factory, Smarte Fabrik und Fabrik der Zukunft.

selbst zu organisieren. Die Umgestaltung zur intelligenten Fabrik führt über Dezentralisierung und autonome Einheiten hin zu cyber-physischen Systemen CPS. Diese CPS – Geräte, Produktionsanlagen, Logistikkomponenten etc. – sind durch kommunikationsfähige Systeme erweitert, die ihre Umgebung erfassen, speichern und auswerten, wodurch sie mit anderen CPS interagieren können. Der Mensch wirkt über Mensch-Maschine-Schnittstellen wie Touch-Displays oder Sprachbefehle auf die CPS ein. Durch CPS-Plattformen werden drei Netze miteinander verbunden: das Internet der Menschen, das Internet der Dienste und das Internet der Dinge. Die Schaffung von intelligenten Fabriken läuft über mehrere Stufen ab, der erwünschte Endzustand wird als System of Systems bezeichnet. In dieser Stufe organisieren sich intelligente CPS selbstständig untereinander und entwickeln daraus neue Fähigkeiten. [73 S. 14ff]

Die Umformtechnik im Besonderen soll von der Vernetzung und Analyse der Daten einen Nutzen ziehen. Ursachen von Prozessschwankungen sollen besser erkannt und dadurch die Produktqualität, die Werkzeuglebensdauer und die Prozesssicherheit verbessert werden. Um einen Umformprozess ideal anpassen zu können, benötigt dieser genaue Informationen über den Zustand des zugeführten Vorproduktes. Ein Beispiel von Informationsflüssen in der Wertschöpfungskette mit Umformprozessen nach GROCHE ist in Abbildung 2.10 dargestellt.

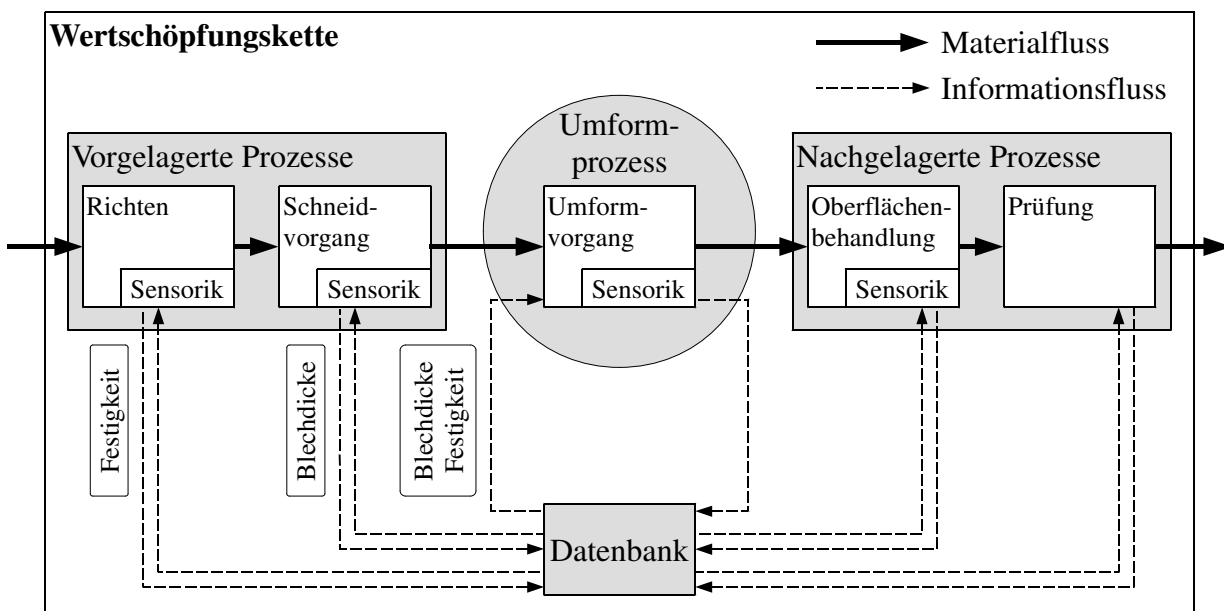


Abbildung 2.10: Informationsflüsse am Beispiel der Blechumformung nach GROCHE [4 S. 2]

Während eines vorgelagerten Trennprozesses wird die Blechdicke ermittelt und die Daten zum Einstellen von Werkzeugpositionen der darauffolgenden Umformprozesse genutzt. Durch die in Abbildung 2.10 dargestellte Vernetzung der Informationsflüsse und die Umsetzung durch intelligente Steueralgorithmen kann der Umformprozess und damit auch die Bauteilqualität verbessert werden. Ein Nebeneffekt ist die vollständige Bauteilüberwachung, mit der einige Fehler vorgelagerter Prozesse in Folgeprozessen ausgeglichen werden können und somit der Ausschuss gesenkt wird. Durch die autonome Ermittlung und Behebung von Prozessfehlern werden die Zeiten zum Einstellen der Werkzeuge verringert. Das Verständnis des Prozesses und der Werkzeuge profitiert ebenfalls von der vollständigen Prozessüberwachung. [4]

NEUGEBAUER u. a. [1] sehen die Umsetzung und den Nutzen der Industrie 4.0 in intelligenten Werkzeugen. Die On-Line-Überwachung und Anpassung des Umformprozesses geschieht innerhalb der Werkzeuge. Dafür müsse die notwendige Sensorik und Aktorik in die Werkzeuge integriert werden.

Ein weiteres Beispiel der Umsetzung von Industrie 4.0 in der Umformtechnik ist das selbstkorrigierende Stanzbiegewerkzeug. Dieses entwickelten die Otto Bihler Maschinenfabrik und die Weidmüller GmbH & Co. KG im Rahmen eines Forschungsprojektes in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie. Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera werden während des Prozesses Formabweichungen aufgenommen und diese Informationen zum Nachstellen des Werkzeuges in Echtzeit verwendet. [76]

GROCHE [77] weist auf die Schwierigkeiten der Informationsgewinnung in Umformprozessen hin. Eine aufwendige und kostenintensive Sensorik werde in den Werkzeugen benötigt und es müsse beachtet werden, dass Prozessdaten temperaturabhängig sind. Servospindelpressen verfügen über Kraft- und Wegsensorik oder können mit geringem Aufwand nachgerüstet werden, so dass die Messsysteme nicht in die Werkzeuge eingebaut werden müssen. In Verbindung mit der hohen Steuerungs- und Regelgüte des Servomotors eignen sie sich daher als CPS für den Einsatz in einer intelligenten Fabrik im Rahmen der Industrie 4.0 in besonderem Maße.

2.1.7 Wandlungsfähige Pressen

Das Umfeld der Produktion wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die sich gegenseitig überdecken und beeinflussen. Aus verschiedenen Bereichen – Technologie, Ökonomie, Umwelt usw. – überlagern sich Einflussfaktoren und führen zu einem turbulenten Unternehmensumfeld. [78] Von diesen stark schwankenden und unvorhersehbaren Produktionsbedingungen ist auch die hochproduktive und spezifizierte Umformtechnik betroffen. Sie muss auf die Herausforderungen durch turbulente Unternehmensumfelder mit neuen Konzepten reagieren. Eine Möglichkeit bietet die Nutzung flexibler Technologien. Die Flexibilität beschreibt die Spanne der Betriebszustände eines Systems. Ein flexibles System ist dadurch gekennzeichnet, dass es eigenständig, ohne Eingriff von außerhalb der Systemgrenzen, auf sich verändernde Einflussfaktoren reagiert. Allerdings sind den Erhöhungen der Systemflexibilität Grenzen gesetzt: Die Flexibilität steht dem Spezialisierungsgrad, und damit der Produktivität von Umformmaschinen, gegenüber. Zusätzlich beeinträchtigt die Unvorhersehbarkeit der Veränderungen von Einflussfaktoren die Bestimmung des notwendigen und wirtschaftlich sinnvollen Flexibilitätsgrades des Systems.

Eine weitere Lösungsstrategie, auf turbulente Umfelder zu reagieren, stellt das Konzept der Wandlungsfähigkeit dar. Während flexible Systeme durch unveränderliche Korridore, die bei der Entwicklung des Systems festgelegt werden, geprägt sind, lassen sich die Flexibilitätskorridore wandlungsfähiger Systeme bezüglich einer oder mehrerer Kennwerte anpassen [79]. Wird beispielsweise der Flexibilitätskorridor der bearbeitbaren Halbzeuge, der wirtschaftlichen Stückzahl oder der herstellbaren Bauteilvarianten eines Systems verschoben, so liegt ein Wandel vor. Im Gegensatz zu flexiblen Systemen erfolgen Wandel nicht eigenständig, die Systeme werden durch äußere Eingriffe verändert. Beispiele für Wandel sind der Austausch oder die Änderung der Abfolge von Teilprozessen oder von Regelungs- und Steuerungskomponenten einschließlich der zugehörigen Sensorik. [2] Am Unterschied zwischen der Wandlungsfähigkeit und der Flexibilität einer Produktionsanlage macht auch STEEGMÜLLER [73 S. 103f] die zukünftigen Anforderungen an Anlagen deutlich: Flexible Anlagen müssen Ressourcen vorhalten, um Veränderungen von Produktvarianten und Stückzahlen abfangen zu können. Im Gegensatz dazu lassen sich wandlungsfähige Anlagen mit geringem Aufwand auch nachträglich umgestalten und dadurch an unvorhergesehene Anforderungen und Produktionsbedingungen anpassen.

Von großer Bedeutung für die Bewertung der Wandlungsfähigkeit ist die Sichtweise aus der Perspektive der gesamten Fabrik. Nach WIENDAHL [80] sind viele Pressen, die auf eine umfangreiche Peripherie wie Fundamente und Schutzeinrichtungen angewiesen sind, nicht wandlungsfähig. Werden die Pressen allerdings nicht auf Fabrikebene, sondern auf Stationsebene betrachtet,

so sind ausführbare Wandel erkennbar: Neue Werkzeuge können eingebaut oder Werkzeugkomponenten ausgewechselt werden. Die im Gegensatz zu konventionellen mechanischen Pressen frei programmierbaren Stößelbewegungsprofile von Servo- und Hydraulikpressen ermöglichen weitere Wandel. Die Stößelbewegung ist anpassbar, womit notwendige Rastphasen für Zusatzprozesse wie Schweißen oder Montieren möglich werden [51]. GROCHE und PAUL [70] [71] erläutern die Wandlungsfähigkeit von Servopressen am Beispiel der Verknüpfung von Schweiß-, Löt- und Montageprozessen mit Umformprozessen. Die Prozessintegration führt dabei zu kürzeren Prozessketten und einer Senkung des Logistikaufwandes. Ein weiteres Beispiel für einen Wandel stellt ein lernender Steueralgorithmus dar, der auf veränderliche Halbzeugqualitäten reagiert. Als Treiber der Wandlungsfähigkeit, sowohl für die Prozessintegration als auch für die Anpassung an Halbzeugschwankungen, werden die frei veränderlichen Stößelbewegungsprofile der Presse genannt. Der Fügeprozess, welcher den Flaschenhals der Prozesskette darstellt, kann allerdings auch für eine Erhöhung der Ausbringung ausgegliedert und vervielfacht werden. Mit diesen Maßnahmen lässt sich die Prozesskette skalieren. Die beschriebenen Wandel verändern die Abfolge und Ausgestaltung von Teilprozessen und verschieben die Bandbreite der effizient herstellbaren Stückzahlen. [2]

Wandlungsfähigkeit erfordert Pressen mit frei einstellbaren Stößelbewegungsprofilen, die durch Austausch oder Neuordnung von Komponenten oder Teilprozessen an turbulente Unternehmensumfelder angepasst werden können. Diese wandlungsfähigen Umformmaschinen ermöglichen es, die Gestaltung und Abfolge der Teilprozesse zu verändern. Teilprozesse können in einer solchen Presse voneinander abgegrenzt und mit einem separaten Stößelbewegungsprofil ausgeführt werden. Servopressen mit Folgeverbundwerkzeugen bieten ein frei programmierbares Stößelbewegungsprofil, allerdings steht dieses nur für die gesamte Prozesskette zur Verfügung. Es fehlt eine Aufgliederung in Teilprozesse, sodass die Einzelprozesse nicht mit einem eigens optimierten Stößelbewegungsprofil gefahren werden können.

Die Möglichkeit der freien Anpassung der Stößelbewegung kann zudem durch neue Regelungsstrategien ausgeschöpft werden. Durch die Erfassung der Bauteilqualität – in Verbindung mit einem lernenden Steuerungsalgorithmus – kann ein stets optimales Stößelbewegungsprofil eingestellt werden. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit, das bearbeitbare Spektrum der Halbzeugqualitäten zu erweitern, die Bauteilqualität zu steigern und den Ausschuss zu minimieren.

2.1.8 Aufbau einer Servospindelpresse

Als Servospindelpressen werden Pressen mit Servospindelantrieb bezeichnet. Servospindelantriebe bestehen grundsätzlich aus Servomotoren, Gewindespindeln und gegebenenfalls Getrieben. Außerdem sind Servospindelpressen im Allgemeinen mit Kraftsensoren ausgestattet. Die Stoßkraft wird durch das Umwandeln des Motormomentes mittels einer Gewindespindel in eine translatorische Bewegung erzeugt. Der Aufbau eines Servospindelantriebes mit drehfester Spindelmutter ist in Abbildung 2.11 illustriert. Das Moment des Servomotors (1) wird bei Bedarf über ein Getriebe (2) verstärkt und mit einer Kupplung (3) an die Spindel (4) übertragen. Die Spindel wird als Kugel- oder Rollengewindetrieb ausgeführt. Bewegungsgewinde wie Trapez- oder Säengewinde werden wegen des schlechten Wirkungsgrades nicht eingesetzt. Die Spindel-lagerung (5) ist meist als Lagerpaket oder im unteren Kraftbereich als kombinierte Axial-Radial-Lagerung ausgeführt. Der Lagerkörper (6) zwischen Lagerung und Außenprofil (7) eignet sich für die Kraftmessung. Zur Erzeugung der translatorischen Bewegung der Spindelmutter (8) wird deren Drehung, beispielsweise durch einen oder mehrere Gleitsteine (9) oder die Ausführung des Pressenstößels (10) als Keilwelle, begrenzt. Am unteren Ende des Außenprofils wird der Stößel in einer Buchse (11) geführt. Der Servospindelantrieb kann über das Außenprofil am Pressenge-stell (12) zentriert und befestigt werden, möglich ist auch ein zusätzlicher Flansch. Mittels einer Werkzeugspannplatte (13) wird das Werkzeug (14) am Pressenstößel montiert. Neben der gezeigten Ausführung können Spindelpressen auch mit rotierender Mutter und translatorisch bewegter Spindel gebaut werden. Der Motor muss nicht zwingend in der hier gezeigten Inline-Bauart angeordnet sein. Ist die Bauraumhöhe begrenzt, wird in Parallel-Bauart gebaut, bei welcher der Motor mit der Motorwelle nach oben zeigend parallel zum Außenprofil angebracht wird. Die Übertragung des Motormomentes auf die Spindel erfolgt dann über Zugmitteltriebe. [81]

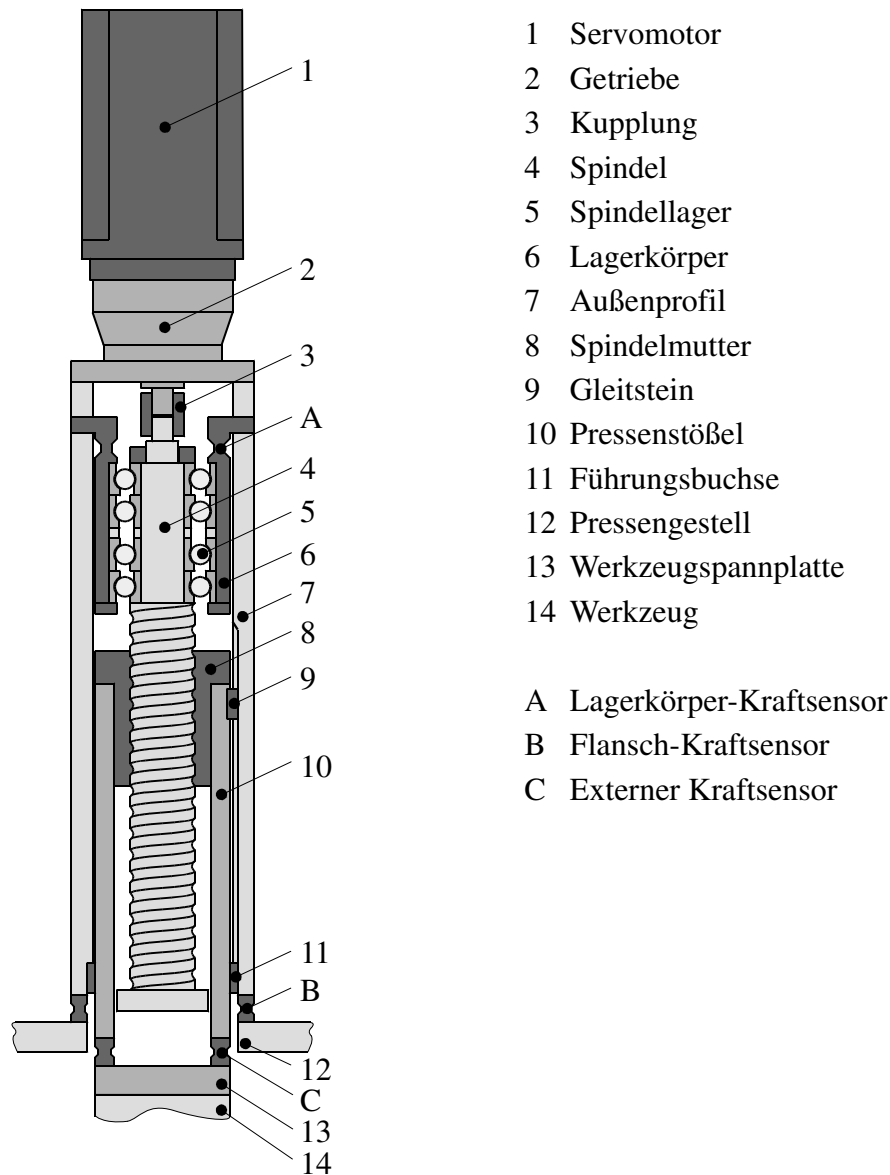


Abbildung 2.11: Aufbau eines Servospindelantriebes [81]

Im Allgemeinen sind Servospindelantriebe mit internen Sensoren zur Kraft- und Wegmessung ausgestattet. Bei besonderen Anforderungen an die Messgenauigkeit können externe Kraft- und Wegsensoren am Pressenstößel oder im Werkzeug angebracht werden und über Mehrkanal-Messverstärker in die Pressensteuerung eingebunden werden. Kraft- und Wegsensoren werden auch als Kraft- bzw. Wegaufnehmer bezeichnet. Es existieren mehrere Möglichkeiten zur Messung der Stößelkraft. Ein ungefährender Kraftwert kann durch die Messung des Motorstromes und eine anschließende Parametrisierung im Servoverstärker ermittelt werden. Die Messunsicherheit beträgt erfahrungsgemäß 10–20 % vom Endwert des Messbereiches, außerdem tritt Rauschen auf. Die Abweichungen werden von thermischen und elektrischen Einflüssen bedingt.

Genauere Messungen werden durch interne und externe Kraftsensoren ermöglicht. Interne Kraftsensoren messen im Kraftfluss der unbeweglichen Bauteile des Pressenantriebes. Üblich ist die Messung der Kraft durch Lagerkörper-Kraftsensoren (Position A in Abbildung 2.11). Dazu wird der Querschnitt des Lagerkörpers an einer definierten Stelle verringert. In dieser Dehnungszone werden Dehnungsmessstreifen appliziert und zu einer Messbrücke verschaltet. Das Messsignal wird anschließend verstärkt, sodass aus dem Dehnungswert der Dehnungszone die Stößelkraft berechnet werden kann. Hierbei ist die erhöhte Wärmeeinbringung durch die Reibung in der Lagerung zu beachten. Interne Kraftaufnehmer können auch als Zusatzbauteile in Form von Flansch-Kraftsensoren (B) die Kraft zwischen dem Außenprofil des Pressenantriebes und dem Pressengestell messen. Die Messungen interner Kraftsensoren werden durch Wärmeeinbringung und Positions- und Lagefehler beeinflusst. Sie erreichen eine Messunsicherheit von 0,5 % vom Endwert des Messbereiches. Noch feinere Messungen werden durch externe Kraftsensoren (C) erreicht. Diese werden zwischen Pressenstößel und Werkzeug eingebaut. Nachteilig ist hierbei das mit jedem Pressenhub bewegte Anschlusskabel des Kraftsensors. Vor allem während des Einrichtens und des Betriebes der Presse besteht die Gefahr der Beschädigung des Kabels. Außerdem benötigen das Kabel und gegebenenfalls die Schleppkette Bauraum. Da externe Kraftsensoren direkt am Pressenwerkzeug messen und nicht durch die Reibungswärme der Lagerung und Lage- und Positionsfehler im Pressenantrieb beeinflusst werden, beträgt die Messunsicherheit nur 0,2 % vom Endwert des Messbereiches. Zudem sind externe Kraftaufnehmer deutlich einfacher auszutauschen.

Ebenso wie bei der Bestimmung der Stößelkraft kann die interne Wegmessung der Antriebe von Servospindelpressen durch externe Systeme ergänzt werden. Für die interne Wegmessung liefert der Winkellagegeber der Servomotoren die notwendigen Signale. Der Wegwert wird aus dem Drehwinkel des Motors und der Spindelsteigung berechnet. Übliche Gebertypen sind Resolver, Singleturn- und Multiturn-Geber [82] [83]. Resolver messen nur die Winkellage der Motorwelle innerhalb einer Umdrehung. Zur Bestimmung der Nullposition des Pressenstößels muss dieser zu Beginn der Bearbeitung eine Referenzfahrt durchführen. Dabei fährt der Pressenstößel vollständig ein, bis die Nullposition von einem Näherungsschalter erfasst wird. Resolver liefern analoge Signale. Da diese weniger störanfällig sind, wird dieser Gebertyp in Sicherheitsanwendungen eingesetzt. Das Referenzieren der Nullposition des Pressenstößels muss auch bei Singleturn-Gebern durchgeführt werden, da diese ebenfalls nur innerhalb einer Umdrehung die Winkellage ermitteln können. Im Gegensatz zu Resolvern liefern Singleturn-Geber ein digitales Signal. Ohne Referenzfahrt zur Bestimmung der Stößelposition kommen Multiturn-Geber aus. Neben der

Drehwinkelmessung zählen und speichern sie die Anzahl der Umdrehungen. Übliche Positioniergenauigkeiten durch die Auswertung des Winkellagegeber-Signals betragen in Abhängigkeit der Messunsicherheit der Geber, des Spindelsteigungsfehlers und des Stößelhubs etwa 0,01 mm. Für feinere Messaufgaben werden externe Wegmesstaster in die Regelung eingebunden, wodurch Positioniergenauigkeiten im Bereich von $\pm 1 \mu\text{m}$ erreicht werden.

Sollen Servospindelantriebe in Pressen zur Blechbearbeitung eingesetzt werden, so müssen sie durch zusätzliche Komponenten ergänzt werden. In Abbildung 2.12 wird ein beispielhafter Aufbau einer Servospindelpresse zur Blechbearbeitung gezeigt. Durch die hohe Variantenvielfalt der Pressen gibt es für die einzelnen Komponenten unterschiedliche Ausführungsarten. Außerdem können, je nach Pressenart, Komponenten hinzukommen und entfallen oder diese anders angeordnet werden. Das Halbzeug wird in einer Bandhaspel (1) oder einem Platinenlader gespeichert und durch Zuführ- bzw. Transportsysteme wie Bandvorschub (2), Feeder, Transfersysteme oder Roboter durch die Presse geleitet. Beim Prozess entstehende Abfälle und Teile werden durch Rutschen (3) oder Transportbänder (4) aus dem Pressenraum geleitet. Das Werkzeug (5) wird mittels Werkzeugspannern (6) am Pressenstößel des Servospindelantriebes (8) und am Pressentisch befestigt. Zum Führen des Stößels werden Säulen- (7), Flach-, Prismen-, Kalotten-, Rollen- oder Schienenführungen verbaut. Die Bearbeitungsenergie der Presse wird durch den Servospindelantrieb (8) aufgebracht und durch das Pressengestell, hier als O-Gestell (9) ausgeführt, aufgenommen. Das Pressengehäuse (10) trennt die Presse von der Umgebung. Zur Steuerung, Regelung und Überwachung können Kraftsensoren (11), Wegmesssysteme und weitere Messaufnehmer eingebaut werden. Die Steuerung der Presse erfolgt über einen Panel-PC (12) oder über andere Eingabegeräte wie Bedienkonsolen mit Tastern oder über Handräder. Die Befehle werden in der Pressensteuerung (13) durch Steuern und Regeln verarbeitet.

- 1 Bandhaspel
- 2 Bandvorschub
- 3 Rutsche
- 4 Transportband
- 5 Werkzeug
- 6 Werkzeugspanner
- 7 Säulenführung
- 8 Servospindelantrieb
- 9 O-Gestell
- 10 Pressengehäuse
- 11 Kraftsensor
- 12 Panel-PC
- 13 Pressensteuerung

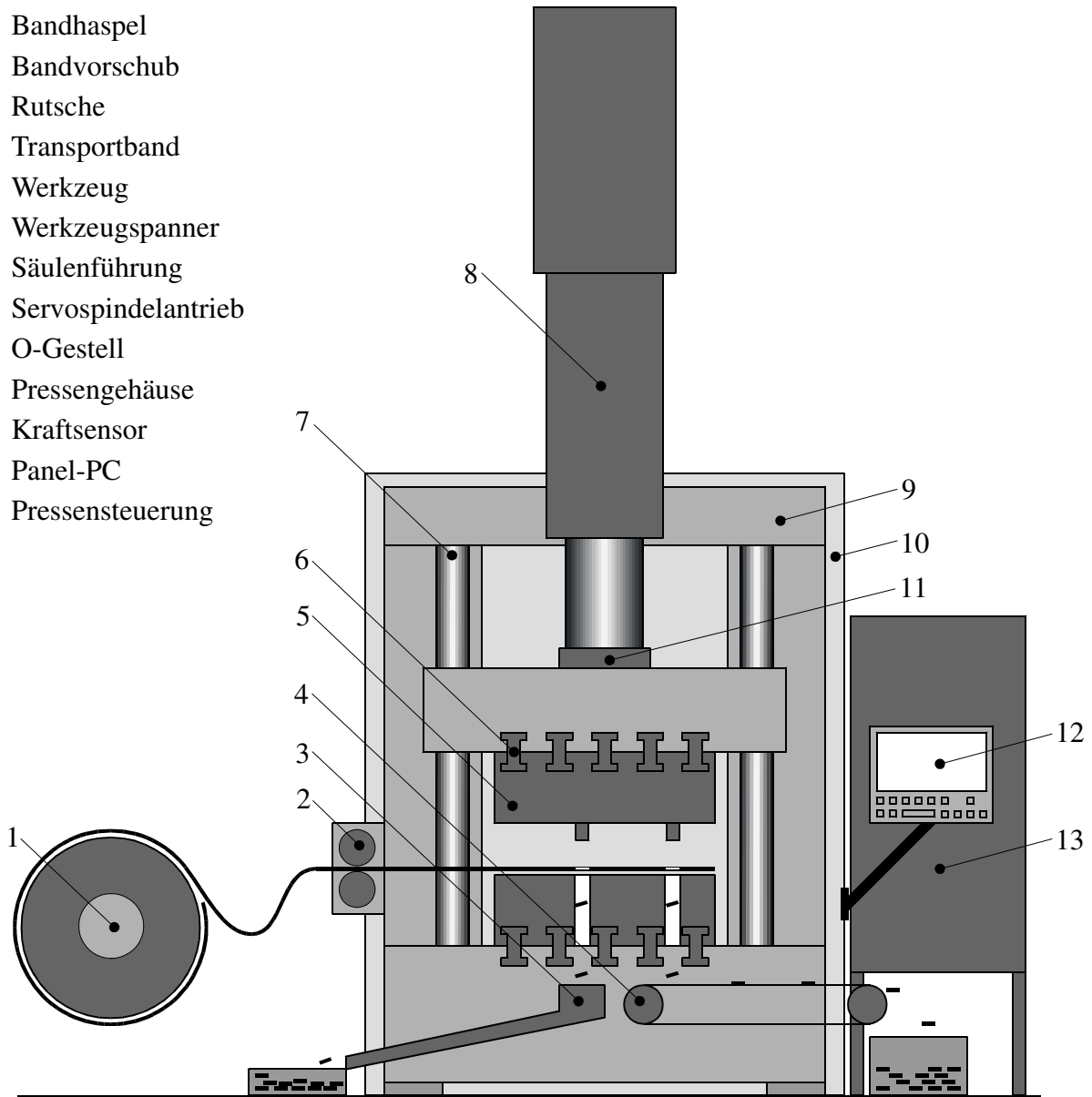


Abbildung 2.12: Aufbau einer Servospindelpresse zur Blechbearbeitung

2.1.9 Einteilung der Pressenwerkzeuge zur Blechbearbeitung

Die Werkzeuge in Pressen werden nach dem Fertigungsverfahren, der Bauteilgröße, der Anzahl an Bearbeitungsstufen, den Führungen und der Wirkungsweise unterschieden. BIRKERT u. a. [26 S. 318] stellen eine Zuweisung der Pressenarten und Werkzeuge zum Fertigen verschieden großer und komplexer Bauteile in einer Übersicht zusammen. Von HOFFMANN u. a. [10 S. 734f] werden Werkzeuge zur Fertigung von Karosserieteilen nach dem Fertigungsverfahren in Zieh-, Beschneide- und Nachformwerkzeuge unterteilt. Außerdem wird hier nach dem Einsatz in Prototypen-, Versuchs-, Großserien- und Kleinserienwerkzeuge unterschieden, die sich in Zielsetzung, Teilestückzahl und -qualität unterscheiden. Pressenwerkzeuge können ebenfalls in Bezug auf ihre Führungssysteme in führungslose Werkzeuge, Werkzeuge mit Säulen- und Werkzeuge mit Plattenführung voneinander abgegrenzt werden [27 S. 16ff]. Wie schon bei den Pressen lassen sich auch deren Werkzeuge in ein- und zweifach wirkend unterscheiden [15]. Zweifach wirkende Werkzeuge können auch auf einfach wirkende Pressen eingesetzt werden, benötigen dann allerdings eine Zieheinrichtung in der Presse. Neben den bisher genannten Unterscheidungskriterien ist eine Differenzierung in Werkzeuge zur Materialprüfung und -bearbeitung möglich.

Die Vereinigung verschiedener Bearbeitungsstufen in Folge-, Verbund- und Mehrfachwerkzeugen ist schon seit dem frühen zwanzigsten Jahrhundert bekannt [84 S. 389ff]. Allerdings bezeichnet KURREIN [84 S. 401] Werkzeuge zur gleichzeitigen Bearbeitung des Werkstückes mit mehreren Verfahren innerhalb einer Stufe noch als Verbundwerkzeug und nicht schon als Gesamtwerkzeug. Heutige Folgeverbundwerkzeuge werden noch als Mehrfachwerkzeuge benannt. Eine schematische Ordnung nach Art und Anzahl der Bearbeitungsstufen, beruhend auf verschiedene Quellen [5] [10] [11] [13] [15] [16] [25] [26] [27] [85] [86] [87], ist in Abbildung 2.13 vorgeschlagen.

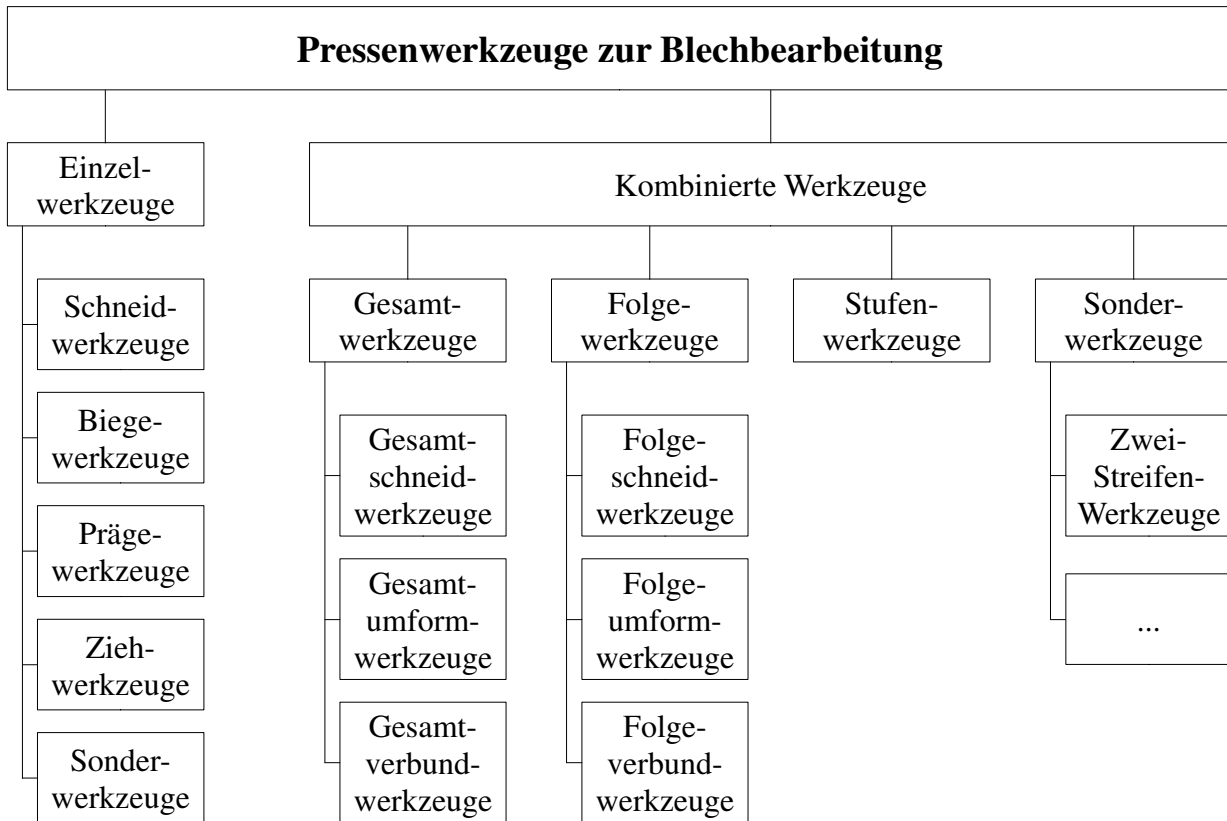


Abbildung 2.13: Ordnung der Pressenwerkzeuge nach Anzahl und Art der Bearbeitungsstufen

Pressenwerkzeuge können grundlegend in Einzel- und kombinierte Werkzeuge unterteilt werden. HESSE [25 S. 111] gliedert die Werkzeuge in Ein-Verfahren-Werkzeuge, die meist Einzelwerkzeuge sind, und kombinierte Werkzeuge. Der Begriff Ein-Verfahren-Werkzeuge wird auch in der DIN 9869-1 [9] und der DIN 9870-2 [87] verwendet, welche verschiedene Stanzverfahren und deren Werkzeuge auflisten. Einzelwerkzeuge können nur einen Fertigungsschritt pro Pressenhub ausführen [10 S. 502] [15 S. 327]. Sie werden nach dem Fertigungsverfahren als Schneid⁴-, Biege-, Präge- oder Ziehwerkzeuge benannt. Außerdem existieren Einzel-Sonderwerkzeuge. DÖGE & BEHRENS [15 S. 366f] beschreiben dazu das Explosivverfahren und das elektromagnetische Umformen. Einzelwerkzeuge werden sowohl zur Fertigung kleiner Teile als auch zur Herstellung großflächiger Fahrzeug-Karosserieelemente in Pressenlinien eingesetzt und dann als Linienwerkzeuge bezeichnet. Werden Einzelwerkzeuge in Pressenlinien eingesetzt, so erfolgt der Teiletransport im Allgemeinen durch Feeder oder Roboter [10 S. 503]. In Einzelwerkzeugen können entweder nur ein Teil oder auch mehrere Teile gleichzeitig gefertigt werden, dies wird als Ein- und Mehrfachanlage bezeichnet [10 S. 502].

⁴ Nach der DIN 8588 ist Schneidwerkzeug eine Abkürzung für Werkzeuge zum Scherschneiden [7 S. 18].

Den kombinierten Werkzeugen, die mehrere Fertigungsschritte pro Pressenhub ausführen können, lassen sich Gesamt-, Folge-, Stufen- und Sonderwerkzeuge zuordnen. Gesamtwerkzeuge unterscheiden sich von Folgewerkzeugen dadurch, dass mehrere Teilprozesse gleichzeitig innerhalb eines Pressenhubes in einer Stufe durchgeführt werden. Exemplarisch ist der Hauptstempel zum Ausschneiden der Außenform des Werkstückes ebenfalls die Schneidplatte für dessen Innenform. Dadurch können Bauteile in engen Toleranzen gefertigt werden. In Folgewerkzeugen finden die Teilprozesse aufeinanderfolgend in mehreren Stufen statt. Gesamt- und Folgewerkzeuge können sowohl nur Schneid- oder Umformprozesse ausführen als auch beide Verfahren miteinander verknüpfen. In Folgeumformwerkzeugen fallen keine Schnittabfälle an, zum Schneiden der Bauteilkonturen und zum Trennen vom Blechband sind vor- und nachgelagerte Prozessschritte notwendig. Werkzeuge, die Teile sowohl durch Schneid- als auch durch Umformverfahren fertigen, werden als Verbundwerkzeuge bezeichnet. Sie erlauben die Herstellung komplexer Teile. In den teuren und aufwendigen Gesamt- und Folgewerkzeugen werden Großserien gefertigt. Stufenwerkzeuge bestehen aus Einzelwerkzeugen, die auf einer gemeinsamen Grund- und Kopfplatte befestigt sind [10 S. 502]. Sie werden zur Fertigung kleiner bis mittelgroßer Teile in hohen Stückzahlen eingesetzt. Stufenwerkzeugsätze unterscheiden sich von Folgewerkzeugen durch den Werkstücktransfer. Während in Folgewerkzeugen der Teiletransport durch das Blechband geschieht, benötigen Stufenwerkzeugsätze im Allgemeinen ein Transfersystem mit Greiferschienen [10 S. 503]. BIRKERT [26 S. 322] differenziert zwischen Stufen- und Transferwerkzeugen, die gleich aufgebaut sind, sich aber durch ihren Einsatz in Stufen- bzw. Transferpressen unterscheiden.

Neben den bisher beschriebenen kombinierten Werkzeugen existieren auch Sonderwerkzeuge. HESSE [25 S. 113] beschreibt ein Zwei-Streifen-Werkzeug, in dem zwei Folgeverbundwerkzeuge rechtwinklig aufeinander zulaufen, sodass im Kreuzungspunkt die Teile beider Blechstreifen gefügt werden.

2.1.10 Schutzrechte mit Bezug auf die Entwicklung des Pressensystems

Es existieren Patent- und Gebrauchsmusterschriften für funktionale Beschaffenheiten des zu entwickelnden Pressensystems nach der Lösungsidee in Kapitel 3.2. Um in der Entwicklungsphase Schutzrechtsverletzungen auszuschließen, werden in diesem Kapitel die entsprechenden Patente und Gebrauchsmuster aufgeführt. Die aufgezählten Schutzrechte sind in einer Übersicht im Anhang dieser Arbeit zusammengetragen.

Die folgenden Schutzrechte beinhalten verschiedene Bauarten und Anordnungen von Servospindelantrieben in Pressen: Eine Presse mit drehender Spindel und drehfester Spindelmutter führen DE 102 97 808 T5 und DE 201 08 706 U1 auf, die gegensätzliche Anordnung aus drehfester Spindel und rotierender Spindelmutter wird in EP 2 193 912 A2, DE 10 2004 054 836 B4 und DE 203 05 789 U1 beschrieben. In die Presse eingebaute Sensoren zur Weg- bzw. Kraftmessung werden in DE 202 10 007 238 U1, DE 201 08 706 U1, EP 0 482 360 B1, DE 102 18 633 B1 und EP 2 099 584 A0 wiedergegeben. Positionierbare Pressen werden in den folgenden Schutzschriften aufgeführt: Einzelne, entlang einer Achse auf einem Tisch verfahrbare Pressenportale sind in DE 10 2009 006 357 A1 und DE 20 2012 101 609 U1 erläutert. Das Patent EP 0 774 173 B1 beschreibt eine Anlage für elektrische Kabelbäume, in der eine Presse entlang einer geradlinigen Bahn feste Stationen anfährt. Automatisiert entlang der Teiledurchlaufrichtung verfahrbare Bearbeitungsmittel werden in EP 2 161 094 B1 vorgestellt.

Das Patent EP 2 756 893 A1 skizziert einen Verstellmechanismus für linear bewegte Umformaggregate, der es ermöglicht, mit einem Spindelantrieb mehrere Umformstationen nacheinander und voneinander unabhängig zu positionieren. Dazu weist jede Umformstation eine Spindelmuttereinheit auf, die aus zwei zueinander verspannten Spindelmuttern besteht. Durch die erhöhte Reibung werden diese bei rotierender Spindel mitgedreht. Die Spindelmuttereinheiten besitzen radiale Aussparungen, in welche die gegenüberliegenden Blockierelemente eingreifen können. Diese sind mit den Umformstationen so verbunden, dass sie bei Betätigung in die Aussparungen der Spindelmuttereinheiten formschlüssig greifen, um deren Drehbewegung zu sperren. Der Kraftschluss der auf der Spindel verspannten Spindelmuttern wird überwunden und eine translatorische Relativbewegung erzeugt. Das Blockierelement ist federnd gelagert, da es erst in die Spindelmuttereinheit eingreifen kann, wenn die Spindel in die richtige Lage gedreht ist, sodass sich beide Elemente gegenüberliegen. Dieser Verstellmechanismus ist in der beschriebenen oder einer abgewandelten Form denkbar für die Positionierung der Pressenmodule des Pressensystems nach Kapitel 3.2, sollte er umgesetzt werden, so ist das Schutzrecht zu beachten.

2.1.11 Problemstellung

Der Stand der Technik verdeutlicht, dass Servospindelpressen häufig in der Montage, seltener für die Blechbearbeitung genutzt werden. Derzeit am Markt befindliche Servospindelpressen zur Blechbearbeitung weisen Nennkräfte von 49 bis 6300 kN auf. Aufgrund der Nennkraft sind Servospindelpressen für die Bearbeitung kleiner Blechteile geeignet, für deren Komplettbearbeitung Umform-, Schneide- und Fügeoperationen erforderlich sind. In der Regel sind die Pressen mit ei-

nem Stößel ausgerüstet. Nur eine Presse ist als Mehrstufenpresse mit mehreren, fest angeordneten Stößeln ausgeführt (Abbildung 2.9). Die bekannten Servospindelpressen erfüllen bezüglich der Komplettbearbeitung von Blechteilen die Forderung nach wandlungsfähigen Produktionssystemen nur bedingt. Blechteile, für deren Komplettbearbeitung mehrere Teilprozesse erforderlich sind, können auf Einstößelpressen nur mit Folgeverbundwerkzeugen mit einem festgelegten Stößelbewegungsprofil für alle erforderlichen Teilprozesse bearbeitet werden. Der Vorteil von Servospindelpressen, prozessangepasste Stößelbewegungsprofile für kritische Teilprozesse zu ermöglichen, kann damit nur sehr eingeschränkt angewendet werden. Eine Veränderung der Anordnung von Teilprozessen sowie die Integration von Zusatzprozessen sind nur bedingt möglich. Auch bei der beschriebenen Mehrstufenpresse mit mehreren Stößeln ergeben sich Einschränkungen bezüglich einer Anpassung der Presse an wandelbare, teilespezifische Abfolgen von Teilprozessen. Da die Stößel einen festen Abstand haben und nicht verfahrbar und miteinander koppelbar sind, wird eine bauteilspezifische Trennung der Teilprozesse pro Stößel den Restriktionen der Maschine bezüglich der Nennkraft pro Pressenstufe und dem Werkzeugeinbauraum unterworfen.

Die Möglichkeit, bestimmte Teilprozesse zu separieren und an einem Stößel mit einem prozessangepassten Stößelbewegungsprofil durchzuführen, ist daher bei den derzeit am Markt befindlichen Servospindelpressen zur Blechbearbeitung eingeschränkt. Eine wandelbare Integration von Zusatzprozessen sowie eine Änderung der Anordnung und Gestaltung der Teilprozesse sind bei den verfügbaren Servospindelpressen nur bedingt möglich. Integrierte Werkzeugwechselsysteme für einen schnellen Austausch von Werkzeugen für die wirtschaftliche Bearbeitung kleiner und wechselnder Serien sowie der situationsbedingten Integration von Zusatzprozessen sind nicht verfügbar. Die Prozessketten lassen sich damit nicht skalierbar gestalten. Auch bezüglich der Ausstattung mit Sensoren und der Erweiterung der Prozessüberwachung gibt es Einschränkungen. Bei geringen Stückzahlen steigt die Bedeutung der Werkzeugwechselzeit für die Fertigungszeit. Daher ist ein schneller Werkzeugwechsel wichtig für eine effiziente Fertigung.

Die Forderung nach wandlungsfähigen Pressen, die unterschiedlichen Anforderungen angepasst werden können, wie beispielsweise die Änderung der Abfolge von Teilprozessen oder der Austausch von Maschinenkomponenten, erfüllen die bekannten Servospindelpressen nur sehr eingeschränkt. Aus diesem Grund wird im Folgenden ein Pressensystem entwickelt, das den geschilderten Anforderungen genügt.

2.2 Produktentwicklung

2.2.1 Methoden der Produktentwicklung

Es bietet sich an, den Entwicklungsprozess nach der im Maschinenbau allgemeingültigen Konstruktionsmethodik durchzuführen, wie sie in der VDI 2221 [88] grundsätzlich beschrieben und in der Literatur zur Produktentwicklung [89] [90] [91] [92] [93] [94] [95] konkretisiert wird. Das Ziel dieser Methodik ist es, den Entwicklungsprozess zu strukturieren und geeignete Lösungen für Probleme aufzuzeigen. Dabei ist zu beachten, dass die beschriebene Konstruktionsmethodik keine zwingend bindende Vorgabe, sondern eine Leitlinie darstellt, die an die Bedingungen der Produktentwicklung angepasst werden kann [88 S. 9] [94 S. 21].

Nach der VDI 2221 besteht der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess eines Produktes aus mehreren Arbeitsabschnitten. In Abhängigkeit der Aufgabe werden die Abschnitte vollständig, teilweise oder mehrmals iterativ durchlaufen. Im ersten Arbeitsabschnitt, der Anforderungsfindung, werden die Anforderungen der Kunden oder aus der Produktplanung in einer Anforderungsliste zusammengestellt. Darauffolgend beginnt der zweite Abschnitt, die Konzeptfindung. Während dieser Phase wird die Gesamtfunktion des Produktes herausgestellt und in Teilfunktionen untergliedert. In einer Funktionsstruktur werden die Teilfunktionen anschließend miteinander kombiniert. Für die Teilfunktionen werden daraufhin Wirkprinzipien gesucht. Die Wirkprinzipien beruhen auf physikalischen Effekten sowie auf geometrischen und stofflichen Merkmalen und bilden den Zusammenhang von Wirkgeometrie, Wirkbewegung und Werkstoff. Durch eine Auswahl werden die Wirkprinzipien eingegrenzt, welche die Umsetzung der Funktionen der Funktionsstruktur abbilden. Das Auswahlverfahren hängt dabei von der Komplexität der Bewertungsaufgabe ab. Zum Erfüllen der Gesamtfunktion werden die ausgewählten Wirkprinzipien miteinander verknüpft und daraus eine Wirkstruktur abgeleitet. Gegebenenfalls muss für die weitere Beurteilung die Wirkstruktur mittels Berechnungen oder Bauraumuntersuchungen zu einem Lösungsprinzip konkretisiert werden. Die Gesamtheit aller Wirkstrukturen bzw. Lösungsprinzipien wird als Prinzipielle Lösung [88 S. 10] bezeichnet. [94 S.54f] Die Darstellung der Prinzipiellen Lösung schließt die Konzeptfindung ab und leitet den folgenden Abschnitt, die Entwurfsfindung, ein. In diesem Abschnitt wird zu Beginn die gefundene Prinzipielle Lösung in realisierbare Module gegliedert und diese Module in einer modularen Struktur abgebildet. Im Anschluss werden zuerst die maßgebenden Module der modularen Struktur soweit durch geometrische, stoffliche und/oder programmtechnische Gestaltung konkretisiert, dass ein Gestaltungsoptimum erkannt und ausgewählt werden kann. Aus dieser Grobgestaltung resultieren Vorentwürfe

für die maßgebenden Module. Durch eine Detaillierung der Vorentwürfe und die Gestaltung der noch fehlenden Module der modularen Struktur wird anschließend der Gesamtentwurf erarbeitet. Dieser beinhaltet als Ergebnis der Entwurfsfindung alle wesentlichen Gestaltmerkmale des Produktes. Im letzten Abschnitt des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses wird der Entwurf ausgearbeitet. Im Rahmen der Ausarbeitung wird die für die Produktion notwendige Produktdokumentation mit Ausführungs- und Nutzungsangaben erstellt, wodurch das Produkt hergestellt werden kann. Eine Übersicht über die Arbeitsabschnitte und Ergebnisse des Entwicklungsprozesses des Pressensystems nach der hier beschriebenen Konstruktionsmethodik ist in Abbildung 4.1 in Kapitel 4.1 aufgestellt.

2.2.2 Methoden zum Ermitteln von Anforderungen

Eine häufige Ursache für den ausbleibenden Erfolg neuer Produkte liegt in der mangelhaften Erfüllung der Erwartungen des Kunden an das Produkt. Der Abnehmer ist nur bereit, ein Produkt zu erwerben, wenn dieses seine Bedürfnisse möglichst umfassend erfüllt, im Idealfall werden die Erwartungen übertroffen. Verbreitet ist u. a. das Kano-Modell⁵ der Kundenzufriedenheit, in dem zwischen Basis-, Leistungs- und Begeisterungsfaktoren unterschieden wird [96 S. 186f]. Beim Kauf von Werkzeugmaschinen verlangt der Kunde nach einer Maschine, die durch ihre technischen Eigenschaften das vorgesehene Produktspektrum effizient fertigen kann. Ein akribisches Sammeln der Anforderungen der – möglicherweise noch nicht überzeugten – Kunden ist daher eine Grundlage für den Erfolg neuer Produkte. Als nützliches Werkzeug dient eine Anforderungsliste, in welcher die zusammengetragenen Anforderungen dokumentiert werden. Grundlagen über die Anforderungsfindung und über Anforderungslisten finden sich in der Literatur zur Konstruktionsmethodik [88] [89] [90] [91] [92] [93] [94] [95] [97 S. 12].

ROTH [91 S. 66ff] stellt verschiedene Methoden zur Findung von Anforderungen zusammen. Durch Beantworten von allgemeingültigen Fragestellungen in Produktfragelisten können Anforderungen abgeleitet werden. Ebenso unterstützen Untersuchungen von Vorgänger- und Konkurrenzprodukten bei der Anforderungssuche. Ein weiteres Hilfsmittel ist die Analyse der Produktumgebung. Hier werden die Umgebungssysteme wie der Wirkort oder das Befehlssystem des Produktes analysiert und deren Wechselwirkungen mit dem Produkt ergründet. Dazu stehen Fragenkataloge zur Verfügung, durch deren Beantwortung Rückschlüsse auf die Anforderungen gewonnen werden können. Ein solcher Fragenkatalog kann ebenfalls durch Untersuchung der Beziehungen des Produktes während seiner Lebenslauf-Phasen verfasst werden. Zusätzlich bietet

5 Weitere Theorien zur Messung der Kundenzufriedenheit sammelt z. B. HÖLZING [98].

sich die genaue Betrachtung der Funktionen an. Indem die Funktionen einer Maschine beim Einrichten, Betreiben, Warten und der Bedien-Software untersucht werden, können weitere Anforderungen gefunden werden. Die Quellen für Anforderungen sind Dokumente, Produkte und Personen, wobei alle Quellen einen unternehmensinternen oder -externen Ursprung haben können. In Abbildung 2.14 sind die von FELDHUSEN u. a. [95 S. 328] zusammengetragenen Anforderungsquellen wiedergegeben und ergänzt. Hervorgehoben werden die von HIPPEL [99] als Lead User bezeichneten Nutzer, welche von technischer Innovation besonders profitieren und mit hohem Interesse die Entwicklung neuartiger Produkte begleiten. Zur Vermeidung von Kommunikationsproblemen müssen Anforderungen eindeutig und verständlich formuliert werden. Zudem sollen Anforderungen lösungsneutral sein, um eine offene Lösungsfindung zu gewährleisten. Anforderungen können qualitativ oder quantitativ sein, also einen semantischen Aussagewert oder einen konkreten Zahlen- bzw. Zustandswert haben. Der Prozess der Anforderungsfindung ist immer rekursiv, neue oder veränderte Anforderungen sollen während des gesamten Entwicklungsprozesses einfließen können.

Firmenintern		Firmenextern
<ul style="list-style-type: none"> • Service Reports • Werksnormen • <i>Vorgängerprojekte</i> 	Dokumente	<ul style="list-style-type: none"> • Gesetze • Normen • Marktdaten • <i>Fachliteratur</i> • <i>Forschungsberichte</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Technologie • Vorgängerprodukte 	Produkte	<ul style="list-style-type: none"> • Konkurrenzprodukte • Trends • Produkte mit ähnlichen Funktionen
<ul style="list-style-type: none"> • Controlling • Einkauf • Konstruktion • Produktion • Marketing • Vertrieb • Entwicklung • <i>Internes Servicepersonal</i> 	Personen	<ul style="list-style-type: none"> • Zulieferer • Kunden • Servicepersonal • <i>Wettbewerber</i> • <i>Lead User</i>

Abbildung 2.14: Anforderungsquellen nach FELDHUSEN u. a. [95 S. 328], Ergänzungen *kursiv*

Zusammengetragen werden die Anforderungen in Anforderungslisten. Diese beinhalten eine Zusammenstellung von Anforderungen und deren Kategorisierung in Wünsche und Forderungen, die qualitativen oder quantitativen Werte der Anforderungen, die Angabe der abteilungs- oder personengebundenen Zuständigkeiten, das Datum sowie Angaben zur Einordnung und Kennung der Anforderungen und des Dokumentes selbst [95 S. 322].

2.2.3 Methoden zum Erstellen der Funktionsstruktur

Funktionsstrukturen werden durch schrittweises und wiederholtes Gliedern einer Gesamtfunktion in Teilfunktionen und einer Analyse der zwischen den Funktionen bestehenden Wechselwirkungen in Form von Stoff-, Energie- und Signalflüssen gebildet. Die Gesamtfunktion wird durch Teilfunktionen erweitert und bildet zusammen mit den Nebenfunktionen, die keinen unmittelbaren Einfluss auf die Ausführung der Gesamtfunktion haben sowie den Wechselwirkungen zwischen den Funktionen die Funktionsstruktur. Ebenso wie die Anforderungsliste wird diese im Laufe des Konstruktionsprozesses immer wieder überprüft und gegebenenfalls angepasst.































Die Komplexität und Tiefe der Funktionsstruktur hängt von der Komplexität der Gesamtfunktion ab. In der Praxis wird die Funktionsstruktur häufig während späterer Arbeitsschritte präzisiert und ergänzt. So werden beispielsweise Energie und Signale eines Antriebes erst dann festgelegt, wenn im Laufe der Komponentenauswahl die Antriebsart bestimmt wird. Eine Anpassung der Funktionsstruktur kann dann hilfreich sein, um neue mögliche Verknüpfungen zu anderen Teilsystemen zu erkennen. Dazu folgendes Beispiel: Für die Verwendung in einem System wurden elektrische Motoren ausgewählt. Diese können elektrische Energie in das Stromversorgungsnetz zurückführen und so Energie für weitere elektrische Maschinen des Systems bereitstellen. Durch Anpassen der Funktionsstruktur wird ein neuer Energiefluss aufgezeigt, der bis zum Schritt der Festlegung auf elektrische Motoren nicht offensichtlich war.

Die Funktionen und die Stoff-, Energie- und Signalflüsse müssen immer vollständig aufgeführt werden, auch wenn sie offensichtlich sind oder sich wiederholen, um keine möglichen Verknüpfungen zu übersehen. So könnte beispielsweise der Schmierstoff-Fluss einer Werkzeugmaschine nicht aufgeführt werden, da dieser offensichtlich vorhanden – weil zwingend notwendig – ist. Dann könnte allerdings übersehen werden, dass geprüft werden sollte, ob der Schmierstoff-Fluss für die Versorgung weiterer Schmierstellen, zur Kühlung oder für zusätzliche Funktionen genutzt werden kann.

Die Anforderungen an den Detaillierungsgrad sind subjektiv und abhängig von der Aufgabe und der Arbeitsweise des Konstrukteurs. Einige Entwickler abstrahieren sehr stark bis auf Funktionszusammenhänge in Boolescher Algebra, während andere beschreibende Wortgruppen nutzen. Verschiedene Modelle von Funktionsstrukturen sammelt ROTH [91 S. 56]. Hilfreich bei der Verallgemeinerung sind die in Abbildung 2.15 dargestellten 30 Allgemeinen Funktionen⁶ [91 S. 81ff], mit denen alle technischen Funktionen abgebildet werden können.

6 ROTH nutzt den Begriff Information statt Signal. Im Folgenden wird der Begriff Signal verwendet.

Diese Induktion ist außerdem eine Voraussetzung zur Verwendung von Konstruktionskatalogen, welche beim Finden von Wirkungen und Lösungen helfen können. Die Darstellung einer Funktionsstruktur durch die Allgemeinen Funktionen fordert von den Entwicklern bei komplexen Strukturen ein sehr hohes Abstraktionsvermögen.

Allgemeine Operationen Allgemeine Größen	Speichern	Übertragen		Wandeln	Verknüpfen						
		Leiten	Umformen		Summativ			Distributiv			
					Gleiche Größen	Verschiedene Größen	Gleiche Größen	Verschiedene Größen			
Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Stoff	1	1.1 	1.2 	1.3 	1.4 	1.5 	1.6 	1.7 	1.8 	1.9 	1.10 
Energie	2	2.1 	2.2 	2.3 	2.4 	2.5 	2.6 	2.7 	2.8 	2.9 	2.10 
Information	3	3.1 	3.2 	3.3 	3.4 	3.5 	3.6 	3.7 	3.8 	3.9 	3.10 




- Die Flußrichtung für die Operation „Leiten“ kann durch einen Pfeil auf einen Richtungssinn eingeschränkt werden, z.B. .
- Irreversible Wandlungen können durch Buchstaben gekennzeichnet werden, z.B. , auch Verbraucher genannt.
- Beim Speicher kann der Anschluß sowohl Eingang als auch Ausgang sein, bei den anderen Symbolen müssen alle Anschlüsse einer Seite nur Eingang und die der anderen nur Ausgang sein. Das Speichersymbol kann eine Quelle darstellen, wenn ein Index zugefügt wird, z.B. .
- Alle nicht beschrifteten Ein- und Ausgänge führen die Größe des Symbols.

Abbildung 2.15: Die Allgemeinen Funktionen von ROTH [91 S. 83]

2.2.4 Methoden zum Finden von Wirkprinzipien

In der Konzeptphase einer Entwicklung werden Wirkprinzipien gesammelt und strukturiert, welche die Teilfunktionen aus der Funktionsstruktur erfüllen. Die VDI 2221 [88 S. 10] verlangt, dass hierbei „physikalische, chemische oder andere Effekte ausgewählt werden“. Um diese Effekte anwendbar zu machen, werden aus ihnen Wirkprinzipien und -strukturen gebildet [88 S. 10] [94 S. 255]. PAHL u. a. [94 S. 121ff] schlagen zum Auffinden und Kombinieren der Wirkprinzipien die folgenden Methoden und Werkzeuge vor:

- Konventionelle Methoden wie Literaturanalysen und Untersuchungen von bekannten bzw. natürlichen Systemen

- Intuitiv betonte Methoden, also das unplanbare Problemlösen durch Ideen, wie Brainstorming oder Delphi-Methode
- Diskursiv betonte Methoden wie Ordnungsschemata, auch als Morphologische Kästen bekannt, und die Verwendung von Konstruktionskatalogen
- Methoden zur Lösungskombination von Teillösungen zu Gesamtlösungen
- TRIZ⁷ mit dem Kernbestandteil ARIZ⁸

Bei der Lösungsfindung durch konventionelle Methoden werden bekannte Systeme untersucht. Dabei können die Zusammenhänge zum untersuchten System offensichtlich sein oder müssen erst noch gefunden werden. Ersteres kennzeichnet beispielsweise das Recherchieren des Standes der Technik oder die Analyse bekannter technischer Systeme, zweiteres u. a. die Bionik und Analogiebetrachtungen.

Das intuitive Lösen von Problemen geschieht in den meisten Entwicklungsprozessen unwillkürlich am Anfang der Lösungssuche. Hat der Entwickler einen guten Einfall, der die Anforderungen an das Produkt erfüllt, ist es nicht mehr notwendig, weitere aufwendige Methoden einzusetzen. Natürlich besteht dann ein hohes Risiko, dass besser geeignete Lösungen übersehen werden. Allerdings sind Entwicklungsressourcen oft knapp, sodass zugunsten einer schnellen, aber dennoch befriedigenden Lösung auf das – eventuell erfolglose – Suchen nach besseren Ergebnissen verzichtet wird.

Verschiedene intuitionsfördernde Methoden wie Brainstorming, Methode 635, Galeriemethode, Delphi-Methode und Synektik werden unter anderem von FELDHUSEN u. a. [95 S. 353ff] beschrieben. Der gemeinsame Nenner dieser Methoden ist, dass die Probleme in Gruppenarbeit gelöst werden. Sie unterscheiden sich in der Ausgestaltung der Gruppenarbeit, beispielsweise dem Strukturierungsgrad oder der Zusammensetzung aus Fachleuten oder fachfremden Personen. Eine in der Entwicklungspraxis gängige Methode ist das Diskutieren unter Zuhilfenahme von Skizzen. Bei Konstruktionsbesprechungen wird skizziert, verglichen, bewertet und zusammengeführt. Das Arbeiten mit Skizzen ist auch Kernbestandteil der Paper-and-Pencil Delphi Exercise [100 S. 5], einer Methode, Gruppenarbeiten zu systematisieren. Die ursprüngliche Delphi-Methode hatte zum Ziel, den Meinungskonsens einer Expertengruppe zu einem bestimmten Thema,

7 TRIZ: Theorie zur Lösung von Aufgaben beim Erfinden. Die TRIZ sammelt Methoden, um Problemstellungen zu abstrahieren und die dabei gefundene Lösung durch anschließende Konkretisierung auf die ursprüngliche Problemstellung anwendbar zu machen. [102 S. 3]

8 ARIZ: Algorithmus zur Lösung erfinderischer Aufgaben. Der ARIZ ist Kernbestandteil der TRIZ zum Erkennen und Überwinden technischer Widersprüche. Dabei nutzt er u. a. Aufstellungen geometrischer, physikalischer und chemischer Effekte, um abstrahierte Probleme zu lösen. [102 S. 45]

in diesem Fall militärstrategische Fragestellungen des Kalten Krieges, zu ermitteln [101]. Später wurde sie weiterentwickelt und angepasst. Seitdem wird sie als Werkzeug von Gruppenbefragungen in wirtschaftlichen, politischen, gesellschaftlichen und weiteren Problemfeldern angewendet, aber auch als Werkzeug zur Lösungsfindung in der Entwicklungsmethodik genutzt. Wird die Delphi-Methode zur Problemlösung verwendet, so ist sie durch das iterative Befragen fachlich geeigneter Personen gekennzeichnet, deren Ergebnisse gesammelt und innerhalb der Gruppe veröffentlicht werden, sodass die Teilnehmer ihre Ideen mit denen der anderen vergleichen und eigene Einfälle überarbeiten können. Anschließend werden die Ergebnisse wiederum allen Teilnehmern gezeigt, damit sie die Ideen bewerten können. Obwohl FELDHUSEN u. a. [95 S. 358f] diese Methodik wegen des hohen Aufwands nicht für konstruktive Diskussionsbeiträge, sondern eher zum Klären von Grundsatzproblemen als geeignet beurteilen, wird sie zum Finden einiger Wirkprinzipien des Pressensystems eingesetzt.

Diskursiv betonte Methoden sind durch ein sukzessives Vorgehen gekennzeichnet. Indem die Lösungssuche in einzelne Abschnitte aufgeteilt wird, soll diese vereinfacht werden. Eine Möglichkeit, technische Systeme zu untersuchen, ist die Analyse des Energie- und Stoffumsatzes, welcher in Gleichungen ausgedrückt wird. Diese Methode wird von RODENACKER [103 S. 73ff] näher beschrieben. Nach der Bildung einer Black-Box-Darstellung mit den entsprechenden Ein- und Ausgängen, hier als logischer Wirkzusammenhang WZH bezeichnet, werden physikalische WZH zur Erfüllung des logischen WZH gesucht. Dabei werden die Parameter der Gleichungen, die einen physikalischen Zusammenhang zur Lösung der (Teil-)Funktion darstellen, isoliert betrachtet. So können diese Parameter und die Effekte, die durch sie beschrieben werden, angepasst und gegebenenfalls neu kombiniert werden. Das Vorgehen wird im folgenden Beispiel kurz erläutert: Bauteile sollen durch Reibung festgehalten werden. Das Festhalten von Körpern an den Kontaktflächen wird durch die Haftreibungsgleichung 1 ausgedrückt.

Haftreibung

$$F_{R,H} \leq \mu_H \cdot F_N \quad (1)$$

Die Haftreibungskraft $F_{R,H}$ ist das Produkt aus Normalkraft F_N und Haftreibungskoeffizient μ_H . Um das sichere Festhalten der Bauteile umzusetzen, kann also die Normalkraft oder der Haftreibungskoeffizient erhöht werden. Da der Haftreibungskoeffizient wiederum von anderen Einflussgrößen wie der Temperatur und der Oberfläche abhängt, könnte eine umsetzbare Lösung das Aufrauen der Kontaktfläche zwischen den Bauteilen sein. Durch die Betrachtung aller Einflussgrößen eines Systems wird das Risiko, Lösungen für Probleme zu übersehen, reduziert.

Die Analyse des Energie- und Stoffumsatzes durch physikalische Beziehungen setzt jedoch voraus, dass alle physikalischen Zusammenhänge eines Systems bekannt sind. Für komplexe Systeme steigt der Bearbeitungsaufwand enorm, wenn die Zugehörigkeiten sämtlicher Einflussparameter dargestellt werden sollen. Bisweilen findet die Aufschlüsselung von Funktionen durch physikalische Gesetze gedanklich statt, sodass die Methode von RODENACKER unwillkürlich genutzt wird. Oft gelingt es dem Entwickler, intuitiv die wichtigen Einflussparameter herauszufiltern, womit die Untersuchung unbedeutender Kenngrößen und das Aufstellen der zugehörigen Gleichungen erspart bleiben. Sollte dies dem Entwickler nicht möglich sein, ist der zeitintensive Einsatz dieser Methode eine Möglichkeit zur Problembewältigung.

Zu den diskursiv betonten Methoden gehört auch das Arbeiten mit Ordnungsschemata. Dabei werden Parameter gegliedert und gegebenenfalls systematisiert. Hohe Bekanntheit hat die Morphologische Box nach ZWICKY [104] erlangt. Das morphologische Forschen verlangt ein vollständiges Lösen verschiedener Probleme aus unterschiedlichen Fachgebieten wie Astronomie, Politik oder Technik. Dadurch ist es als Mittel zum Finden vielfältiger Wirkprinzipien beim Konstruieren sehr gut geeignet. Ein Mittel der morphologischen Forschung sind Ordnungsschemata, die als Morphologische Boxen oder als Morphologische Kästen bezeichnet werden. Im Vergleich zu der Methode von RODENACKER stellen Ordnungsschemata die Lösungsvielfalt nicht durch Analyse der physikalischen Gleichungen, sondern durch Aufgliedern von Funktionen in Teilfunktionen dar. Zu Beginn wird die Gesamtfunktion eines Systems in Teilfunktionen aufgeteilt und diese zeilenweise in einer Tabelle notiert. Im zweiten Schritt werden für jede dieser Teilfunktionen unterschiedliche Wirkprinzipien gesammelt und in die entsprechenden Tabellenzellen eingetragen. Abschließend werden sinnvolle Kombinationen der Wirkprinzipien gebildet, welche die Gesamtfunktion erfüllen. Diese Kombinationen können durch Pfade im Morphologischen Kasten eingetragen werden. Die Verwendung von Ordnungsschemata setzt voraus, dass die Wirkprinzipien weitgehend vollständig sind. Eine Hilfestellung dazu bieten FELDHUSEN u. a. [95 S. 375] an, hier werden ordnende Gesichtspunkte gesammelt. Durch das Kategorisieren der Wirkprinzipien nach diesen ordnenden Gesichtspunkten werden noch fehlende Wirkprinzipien offensichtlich und können ergänzt werden. Als Ergebnis sollte eine möglichst vollständig besetzte Tabelle entstehen, deren Lösungspfade anschließend bewertet werden können. Abbildung 2.16 zeigt dieses Vorgehen an einem Beispiel.

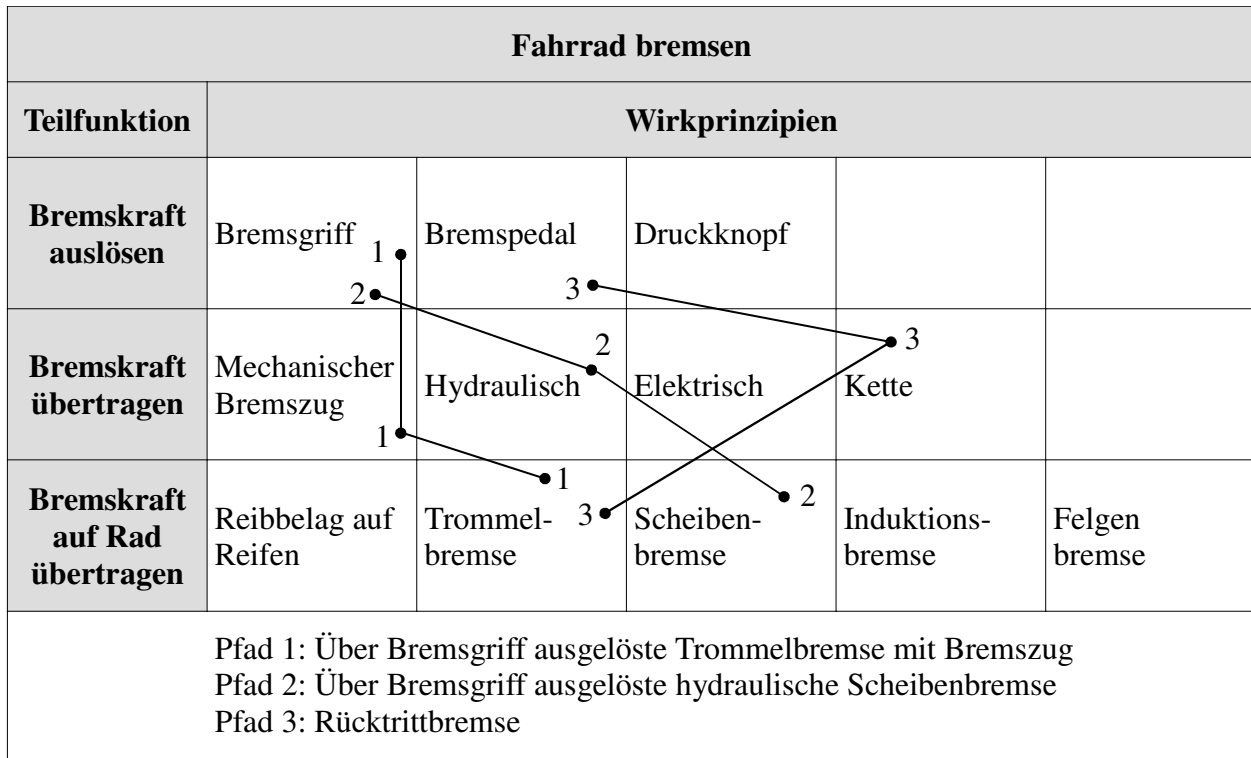


Abbildung 2.16: Morphologischer Kasten

Es sollen verschiedene Lösungen gefunden werden, um die Gesamtfunktion „Fahrrad bremsen“ zu erfüllen. Hierzu wird die Funktion in die drei Teilfunktionen „Bremskraft auslösen“, „Bremskraft übertragen“ und „Bremskraft auf Rad übertragen“ aufgeteilt. Für jede Teilfunktion werden anschließend Wirkprinzipien ermittelt. Diese werden daraufhin zu sinnvollen Lösungen kombiniert und als Pfade gekennzeichnet. Dabei ist auf die Verträglichkeit der Wirkprinzipien eines Pfades zu achten, sodass nur umsetzbare Lösungen aufgestellt werden, die den grundlegenden Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt entsprechen. Ein Vorteil der Morphologischen Kästen ist die übersichtliche Darstellung. Werden im Konstruktionsverlauf Schwierigkeiten erkannt, so können in einigen Fällen durch ein erneutes Analysieren des Morphologischen Kastens und Austauschen der Lösungskomponenten die Probleme gelöst werden.

Eine weitere diskursiv betonte Methode zum Finden von Wirkprinzipien ist die Nutzung von Konstruktionskatalogen. Eine Übersicht von Katalogen, geordnet nach Anwendungsgebieten, zeigt PAHL [94 S. 154f]. Kataloge sind auch hilfreich beim Ausfüllen von Morphologischen Kästen.

2.2.5 Methoden zum Bewerten von Wirkprinzipien

Nachdem Wirkprinzipien zur Erfüllung der Teilfunktionen gefunden wurden, müssen geeignete Lösungen ausgewählt werden, die im weiteren Verlauf der Produktentwicklung umgesetzt werden sollen. Zu diesem Zweck werden verschiedene Bewertungsverfahren eingesetzt, deren Komplexität und Aufwand der Bewertungsaufgabe angemessen sein muss. Eine Auswahl verschiedener Methoden zur Bewertung von Lösungen zeigt Abbildung 2.17.

	Argumentenbilanz	Gewichtete Punktbewertung	Nutzwertanalyse
Prinzip	Auflisten und Vergleichen von Vor- und Nachteilen	Punktbewertung durch Summieren der Produkte aus gewichteten Bewertungskriterien und Einzelwertungen	Ergänzung der Punktbewertung durch relative und absolute Wichtung der Bewertungskriterien
Entscheidung	Intuitiv	Intuitiv-diskursiv	Diskursiv
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr schnell und einfach durchführbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Kurzfristig durchführbar • Bei Änderungen leicht anpassbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Minimierung arbiträrer Wichtung • Keine Wichtung zwischen Nutzen und Kosten notwendig
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Sortierung nach Kriterien • Keine Wertigkeit der Kriterien • Kein Vergleich zwischen den Argumenten • Potenziell hoher Grad an Subjektivität 	<ul style="list-style-type: none"> • Gefahr arbiträrer Wertigkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Wichtung nur innerhalb einer Hierarchiestufe • Geringer Einfluss wichtiger Kriterien in unteren Hierarchiestufen
Aufwand	Gering	Mittel	Hoch
Einsatz	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Problemkomplexität und Investitionskosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe bis mittlere Komplexität und Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Komplexe Probleme mit vielen Bewertungskriterien
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> • [95 S. 387] • [105 S. 228] • [106 S. 64] • [107 S. 324] • [108 S. 144] 	<ul style="list-style-type: none"> • [93 S. 184] • [95 S. 387] • [106 S. 65] 	<ul style="list-style-type: none"> • [93 S. 285] • [95 S. 390] • [105 S. 255] • [108 S. 147] • [109 S. 115] • [110]

Abbildung 2.17: Vergleich verschiedener Verfahren zur Bewertung von Lösungen

Das Aufstellen einer Argumentenbilanz, also das intuitive Vergleichen von Vor- und Nachteilen, benötigt nur wenig Zeit, weil auf das Formulieren von Kriterien verzichtet wird und die Vor- und Nachteile nicht quantifiziert werden. Da Informationen unvollständig oder gar falsch sein können, ist eine weitere Stärke der Argumentenbilanz, dass nur solche Informationen gewertet werden, die als sicher gelten. Die Schwächen des Verfahrens liegen in dem hohen Risiko willkürlicher Entscheidungen und dem hohen Ausmaß an Subjektivität. Außerdem wird nicht explizit nach Vergleichskriterien gesucht, wodurch wichtige Eigenschaften übersehen werden können. Daher eignet sich die Argumentenbilanz bei sehr einfachen Entscheidungsaufgaben.

Die Punktbewertung nach subjektiv gewichteten Kriterien ist ein Kompromiss zwischen Bearbeitungsaufwand und Objektivität. Bei dieser Bewertungsmethode werden verschiedene Bewertungskriterien gesammelt und deren Gewichtung festgelegt. Dazu eignen sich die in Abbildung 4.18 in Kapitel 4.3.4 aufgeführten Methoden Präferenzmatrix und Rangfolgeverfahren. Im Anschluss an die Festlegung der Gewichtung werden Punktzahlen für jedes Wirkprinzip und jedes Kriterium vergeben, welche den Erfüllungsgrad der Kriterien widerspiegeln. Der Punktebereich ist nicht festgelegt. Niedrige Bereiche erschweren die Differenzierung, ein großer Punktebereich muss durch ausreichend vorhandene Informationen abgedeckt sein. Eine Bewertung erfolgt durch Multiplikation der Punktzahlen mit der Gewichtung, was einen Vergleich von Zahlenwerten zulässt. Die gewichtete Punktbewertung eignet sich für Entscheidungsaufgaben mit geringer bis mittlerer Komplexität.

Komplexere Entscheidungsaufgaben oder ein gesteigertes Risiko durch hohe Investitionskosten eines neuen Produktes verlangen nach einer eingehenderen Wichtung der Bewertungskriterien und einer detaillierteren Punktevergabe. Zu diesem Zweck stehen verschiedene Bewertungsverfahren mit stark differenzierter Rangordnung der Gewichtung zur Verfügung. Ein Beispiel dafür ist die Nutzwertanalyse. Diese Bewertungsmethode ist durch die mehrfache Aufgliederung der Bewertungskriterien und die dadurch mögliche Wichtung der Bewertungskriterien nach ihrer Hierarchiestufe gekennzeichnet. Aufgrund der ausgeprägten Strukturierung der Gewichtung besteht allerdings die Gefahr, dass wichtige Bewertungskriterien auf sehr niedrige Hierarchiestufen gesetzt werden. In diesem Fall erreichen sie nur sehr niedrige Stufengewichte und beeinflussen die Gesamtwertung in zu geringem Maße. Bei komplexen Bewertungsaufgaben besteht dabei die Gefahr, zweckdienliche Gewichtungen nicht entsprechend kontrollieren zu können. BREIING [105 S. 255] beweist, dass bei geringer Kriterienzahl ein Abschätzen der Wichtung legitim ist. Die Beurteilung in der Nutzwertanalyse erfolgt mittels Wertungszahlen, z. B. von 0 bis 10, daher werden entsprechend viele Kenntnisse über die einzuschätzenden Systeme vorausgesetzt.

Eine weitere verbreitete Bewertungsmethode für komplexe Entscheidungsaufgaben stellt die technisch-wirtschaftliche Bewertung nach KESSELRING [105 S.230ff] dar. Der Ablauf der technisch-wirtschaftlichen Bewertung ist in der VDI 2225-3 [111] beschrieben. Zu Beginn der Untersuchung werden Bewertungsmerkmale aus Wunschforderungen der Anforderungsliste und weiteren technischen Eigenschaften, die erst während des Durchlaufens der Konzeptphase offensichtlich werden, gesammelt. Technische Eigenschaften sind z. B. Bedien- oder Designvorstellungen, welche aus den Wirkprinzipien hervorgehen. Aus den Bewertungsmerkmalen werden anschließend Bewertungskriterien formuliert. Die Bewertungskriterien können gewichtet werden, um deren Bedeutung in die Bewertung einfließen zu lassen. Bei der im Folgenden erläuterten Variante werden Bewertungskriterien mit annähernd gleicher Bedeutung genutzt. Dadurch wird der Einfluss subjektiver Wichtung der Faktoren begrenzt. Mehrere Einzelkriterien mit geringerer Bedeutung werden in einem Bewertungskriterium zusammengefasst. Da Kriterien sowohl qualitativ als auch quantitativ und oft in nicht vergleichbaren physikalischen Einheiten abgefasst sind, werden sie durch eine Punktbewertung vereinheitlicht. Die Norm schlägt eine Punktbewertungsskala von 0 bis 4 Punkten vor, wobei 0 Punkte eine unbefriedigende und 4 Punkte die ideale Erfüllung des Bewertungskriteriums ausdrücken. Kriterien, welche mittels physikalischer Einheiten darstellbar sind, werden auf die Punktskala normiert. Die Punktevergabe von qualitativen Bewertungskriterien geschieht mittels Beurteilung durch möglichst mehrere Personen.

Zum Bewerten der technischen Aspekte wird eine Vergleichsgröße, die technische Wertigkeit x , für jedes Wirkprinzip n berechnet. Diese wird nach Gleichung 2 aus dem Verhältnis der summierten Punkte p einer Lösung nach m Kriterien zur maximal möglichen Punktzahl $m \cdot p_{max}$ gebildet. [111 S. 4]

Technische Wertigkeit

$$x_n = \frac{\sum p_m}{m \cdot p_{max}} \quad (2)$$

Zur Normierung der technologischen Bewertung auf die Kosten erfolgt im Anschluss die wirtschaftliche Bewertung der Wirkprinzipien. Die wirtschaftliche Wertigkeit drückt die Herstellkosten der Wirkprinzipien aus. In der VDI 2225-1 [112] wird die vereinfachte Berechnung der Herstellkosten bei Eigenfertigung beschrieben.

Die Berechnung der wirtschaftlichen Wertigkeit y des Wirkprinzips n erfolgt nach Gleichung 3. Es werden die idealen Herstellkosten H_i in Relation zu den Herstellkosten des Wirkprinzips H_n gesetzt. Wenn alle Teile eingekauft werden, sind die Herstellkosten H_n gleich den Beschaffungskosten B_n . Bei neuartigen Systemen fehlt die Vergleichbarkeit mit bestehenden Maschinen auf dem Markt, daher werden die idealen Herstellkosten H_i durch die Beschaffungskosten des preiswertesten Wirkprinzips B_{min} beschrieben. Das GABLER Wirtschaftslexikon [113 S. 380] definiert die Beschaffungskosten als gesamte Kosten aus Einkaufspreis und Nebenkosten zur Beschaffung von Gütern.

Wirtschaftliche Wertigkeit

$$y_n = \frac{H_i}{H_n} = \frac{B_{min}}{B_n} \quad (3)$$

Die Kombination der technischen und der wirtschaftlichen Wertigkeit wird als Stärke s bezeichnet. Prinzipiell können zur Berechnung der Stärke alle Mittelwertarten wie das arithmetische, harmonische oder geometrische Mittel genutzt werden. Durchgesetzt haben sich sowohl das arithmetische als auch das geometrische Mittel. Die Berechnung der Stärke $s_{a,n}$ eines Wirkprinzips n durch arithmetische Mittelwertbildung gibt Gleichung 4 wieder.

Stärke eines Wirkprinzips durch arithmetische Mittelwertbildung

$$s_{a,n} = \frac{x_n + y_n}{2} \quad (4)$$

Wirkprinzipien mit geringen Abweichungen innerhalb der Einzelbewertungen liefern im geometrischen Mittel höhere Werte als solche mit gleich großem arithmetischem Mittel aber hohen Unterschieden in der technischen und wirtschaftlichen Bewertung [105 S. 199f]. Um den Einfluss der Ausgeglichenheit von Bewertungen zu erhöhen, kann zum Vergleich von Wirkprinzipien die Stärke $s_{g,n}$ aus dem geometrischen Mittelwert nach Gleichung 5 gebildet werden.

Stärke eines Wirkprinzips durch geometrische Mittelwertbildung

$$s_{g,n} = \sqrt{x_n \cdot y_n} \quad (5)$$

Erreichen mehrere Wirkprinzipien die gleiche Stärke, so sollte wegen der besseren Ausgeglichenheit die Variante bevorzugt werden, welche näher an der Geraden $y = x$ liegt. Abbildung 2.18 vergleicht die arithmetische und geometrische Mittelwertbildung zum Berechnen der Stärke.

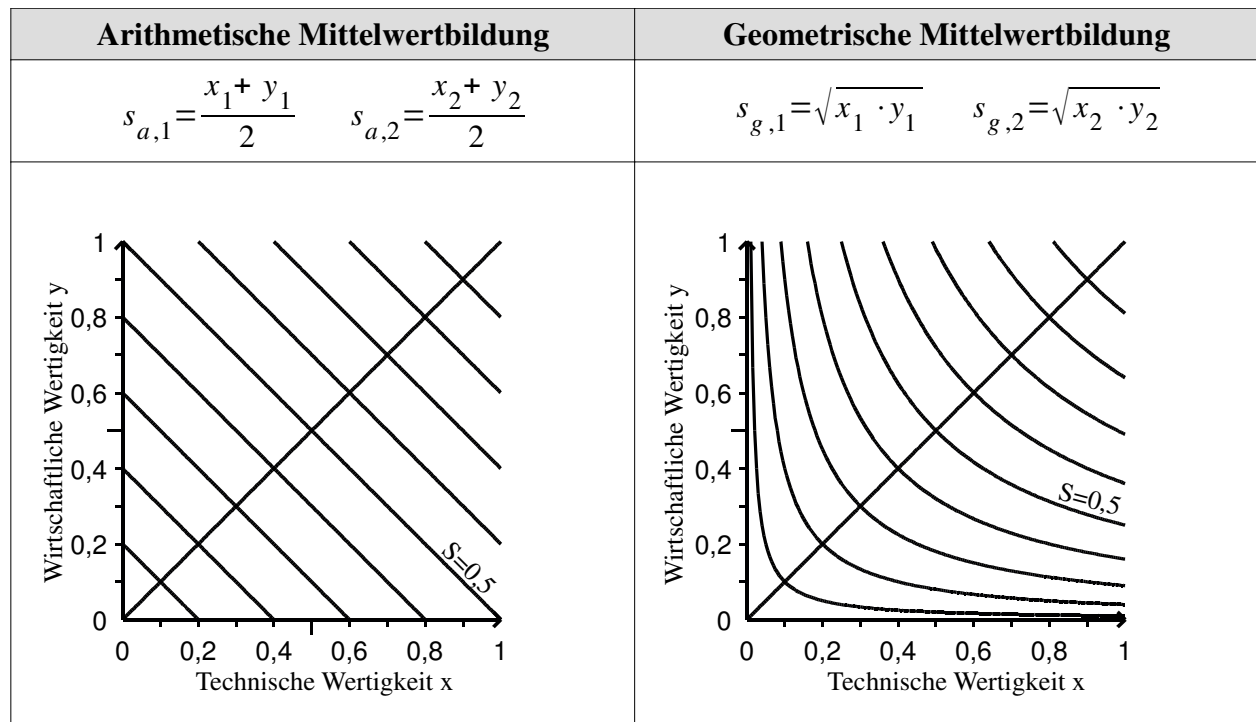


Abbildung 2.18: Berechnung der Stärke durch arithmetische und geometrische Mittelwertbildung

Es ist prinzipiell möglich, zusätzlich zur wirtschaftlichen Bewertung eine Bewertung nach weiteren Gesichtspunkten durchzuführen. So können Aspekte wie Leichtbau, Energieeffizienz oder Bauraumbedarf von so hoher Bedeutung sein, dass diese Eigenschaften neben den technischen und wirtschaftlichen gesondert bewertet werden müssen. Die VDI 2225-3 [111] nennt zwar diese Möglichkeit, konkretisiert diese aber nicht. BREIING [105 S. 200] zeigt die dreidimensionale Darstellung der technischen, wirtschaftlichen und psychologischen Bewertung eines Systems.

Neben den bisher genannten Bewertungsmethoden existieren unzählige weitere wie die anforderungsorientierte gewichtete Bewertung, die Kosten-Nutzen-Analyse, die Bewertung durch Bedeutungsprofile oder der Analytic Hierarchy Process, der von SAATY [114] erläutert wird. Eine Entscheidungshilfe zum Einsatz der Methoden liefert die entsprechende Literatur [93] [95 S. 386] [105] [108]. Um den Einfluss subjektiver Entscheidungen möglichst gering zu halten, sollen vor allem intuitive Bewertungsverfahren in Gruppen durchgeführt werden. Allerdings kann dadurch der Aufwand enorm steigen, da die Gruppen groß genug sein müssen, um Ausreißer zu relativieren.

2.2.6 Gestaltungsleitlinien beim Entwurf

Für das Gestalten formulieren FELDHUSEN & GROTE [95 S. 488] die in Abbildung 2.19 dargestellte Leitlinie, in der wichtige Hauptmerkmale von Konstruktionen gesammelt sind. Entwürfe sollen immer hinsichtlich der Leitlinie überprüft werden, um wichtige Aspekte im Produktentstehungsprozess nicht zu vernachlässigen. Weitere Anregungen und Hinweise zur Produktgestaltung finden sich in der entsprechenden Literatur [115] [116] [117] [118] [119] [120] [121].

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Funktion: <ul style="list-style-type: none"> • Erfüllung der Funktion • Erforderliche Nebenfunktionen • Wirkprinzip: <ul style="list-style-type: none"> • Effekt, Wirkungsgrad, Nutzen • Erwartbare Störungen • Auslegung: <ul style="list-style-type: none"> • Haltbarkeit, Formänderung, Stabilität, Resonanzfreiheit, Ausdehnung, Korrosions- und Verschleißverhalten • Sicherheit: <ul style="list-style-type: none"> • Betriebs-, Arbeits-, Umweltsicherheit • Ergonomie: <ul style="list-style-type: none"> • Mensch-Maschine-Beziehungen • Belastung, Beanspruchung, Ermüdung • Formgebung (Design) • Fertigung: <ul style="list-style-type: none"> • Technologie, Wirtschaftlichkeit • Kontrolle: <ul style="list-style-type: none"> • Sind notwendige Kontrollen möglich und veranlasst? | <ul style="list-style-type: none"> • Montage: <ul style="list-style-type: none"> • Einfachheit, Eindeutigkeit • Transport: <ul style="list-style-type: none"> • Sind inner- und außerbetriebliche Bedingungen überprüft und berücksichtigt? • Gebrauch: <ul style="list-style-type: none"> • Alle beim Betrieb/Gebrauch auftretenden Erscheinungen wie Geräusch, Erschütterung, Handhabung • Instandhaltung: <ul style="list-style-type: none"> • Sind Wartungs-, Inspektions-, Instandsetzungsmaßnahmen durchführbar und kontrollierbar? • Recycling • Kosten: <ul style="list-style-type: none"> • Sind Kostengrenzen einzuhalten? • Zusätzliche Betriebs-/Nebenkosten • Termin: <ul style="list-style-type: none"> • Sind Termine einhaltbar? • Gestaltungsmöglichkeiten, welche die Terminsituation verbessern |
|---|---|

Abbildung 2.19: Leitlinie nach FELDHUSEN & GROTE [95 S. 488]

2.2.7 Produktstrukturierung

Fertiger mit hoher Ausführungsvielfalt ihrer Produkte suchen Fertigungsmittel, die möglichst viele ihrer Produktvarianten abbilden können. Sie haben dann die Möglichkeit, flexible Maschinen anzuschaffen, die weit über die zum Zeitpunkt der Anschaffung festgelegten Kennzahlen hinaus gehen, um auch zukünftige Anforderungen erfüllen zu können. Darunter leidet allerdings die Wirtschaftlichkeit, zumal zukünftige Maschinenanforderungen nur schwer bestimmbar sind. Eine andere Möglichkeit stellen Maßnahmen der Produktstrukturierung dar, welche die Maschinen erweiterungsfähig machen, um an kommende Entwicklungen angepasst werden zu können. Hierbei übernimmt der Werkzeugmaschinenproduzent die Aufgabe, auch zukünftige Anforderungen an seine Maschine zu beurteilen. Gelingt ihm dies, so wird die Attraktivität der Maschine aus Käufersicht erhöht. Auch aus Sicht des Werkzeugmaschinenproduzenten ergeben sich aus geeigneten Maßnahmen der Produktstrukturierung weitere Vorteile.

Der Begriff Produktstruktur – im Englischen wird er synonym mit product architecture verwendet – steht für die schematische Zuordnung der Funktionen eines Produktes zu seinen physischen Komponenten. Nach ULRICH [122 S. 420] ist die Produktstruktur die Anordnung funktionaler Elemente und deren Zuordnung zu den physischen Komponenten sowie die Spezifikation der Schnittstellen innerhalb der wechselwirkenden physischen Komponenten. Als physische Komponenten werden Einzelteile und Unterbaugruppen benannt. Der Begriff der Komponenten bezieht sich auch auf nicht physische Objekte, wie Software-Unterprogramme oder Bereiche innerhalb integrierter Schaltkreise, sofern diese abgrenzbar sind. RAPP kritisiert, dass diese Definition das Zusammenwirken von Komponenten ohne gemeinsame Schnittstellen nicht beachtet. Daher wird von RAPP [123 S. 9] folgende Begriffsbestimmung vorgeschlagen: „Die Produktstruktur widerspiegelt die Zusammensetzung eines Erzeugnisses aus Teilelementen und deren Zuordnung untereinander.“ Die „eigentliche Produktstruktur“ [123 S. 10] beinhaltet nach RAPP keine weiteren Strukturstufen in Form von Einzelteilen und Baugruppen, diese wird als Erzeugnisgliederung bezeichnet.

Demgegenüber verwenden SCHUH [124 S. 119] und CONRAD [125 S. 287] die Begriffe Erzeugnisgliederung, Erzeugnisstruktur und Produktstruktur synonym. Im Folgenden wird von der Definition einer Produktstruktur im Sinne von SCHUH [124 S. 119], CONRAD [125 S. 287] und weiteren [126 S. 14] [127 S. 22] ausgegangen:

Die Produktstruktur stellt die Abhängigkeiten der Produktkomponenten dar und zeigt mögliche Ordnungen der Komponenten in weiteren Strukturstufen an.

Mithilfe der Produktstruktur wird also die innere Komplexität eines Produktes abgebildet. Auf Grundlage der Produktstruktur wird durch das Zusammenfassen von Komponenten zu Baugruppen die Bildung von Modulen, Baukästen, Baureihen, Typengruppen, Plattformen und Paketen ermöglicht. Die Ziele der Produktstrukturierung nach SCHUH [124 S. 119f] sind vielseitig und betreffen verschiedene Ebenen:

- Strukturierung der Komponenten eines Produktes und des Konstruktionsprozesses
- Vereinheitlichung von Zeichnungen und Stücklisten
- Mehrfachverwendung von Komponenten
- Verringerung der Produktionsdaten und Verbesserung des Informationsaustausches
- Verbesserungen für die Informationsverarbeitung und Verbesserungen in der Materialdisposition
- Schaffung von Wettbewerbsvorteilen durch nutzbare Strukturierung

Produktstrukturierungsmaßnahmen können vielseitige Effekte erzielen, beginnend bei der Produktplanung über die Entwicklung, Konstruktion, Dokumentation, Fertigung, Montage, Instandhaltung und Logistik. Durch Vereinheitlichungen können Konstruktions-, Fertigungs- und Lagerkapazitäten eingespart und dadurch die Auftragsabwicklung verkürzt werden. Die Montage zieht den Nutzen aus der Zusammenfassung zu Modulen, ebenfalls können Wartungsarbeiten durch einen Modulaustausch vereinfacht werden. Ein weiterer wichtiger Effekt der Produktstrukturierung sind Wettbewerbsvorteile durch kundenindividuell anpassbare Produkte. Im Rahmen festgelegter Grenzen kann das Produkt konfiguriert werden und damit Vorteile gegenüber Konkurrenzprodukten bieten. [124 S. 119f] [128]

Arten der Produktstrukturierung

Produkte und deren Komponenten können, um verschiedene Ziele zu erreichen, in den gegensätzlichen Ausprägungen Integral- und Differenzialbauweise gebaut werden [129 S. 311f]. Die Kennzeichen sowie die Vor- und Nachteile beider Bauweisen sind in Abbildung 2.20 gegenübergestellt. In vielen Fällen lassen sich – vor allem komplexe – Produkte nicht ausschließlich einer Bauweise zuordnen, da Funktionen selten von nur einem Bauteil erfüllt werden bzw. Bauteile meist mehrere Funktionen erfüllen.

Integralbauweise		Differenzialbauweise
Ein Bauteil erfüllt mehrere Funktionen.	Kennzeichen	Ein Bauteil erfüllt eine Funktion.
<ul style="list-style-type: none"> • Weniger Einzelteilaufwand • Weniger Schnittstellenaufwand • Unterstützt Leichtbauweisen 	Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Entstehung der Varianz wird in die Montage verlegt [123 S. 63] • Leichtere Handhabung der Einzelteile [123 S. 64] • Austausch bei Reparaturen • Vereinfacht die Entwicklung von Modul- und Baukastensystemen, Paketen, Plattformen
<ul style="list-style-type: none"> • Schwierigere Handhabung möglich • Reparatur und Austausch erschwert 	Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Höherer Einzelteilaufwand • Innerer Schnittstellenaufwand

Abbildung 2.20: Gegenüberstellung von Integral- und Differenzialbauweise

Nach SCHUH [124 S. 125ff] lassen sich Produktstrukturen neben der Integral- bzw. Differenzialbauweise in die Produktstrukturtypen Baukästen, Module, Baureihen und Pakete ordnen. Allerdings bemerkt SCHUH [124 S. 127], dass Baureihen keinen eigenen Produktstrukturtyp bilden, da Baureihenkonzepte nicht die Beziehung der Komponenten untereinander aufzeigen. Vielmehr beziehen sich diese nur auf die Produkteigenschaften.

Nach VIETOR & STECHERT [95 S. 820] sind Baureihen „technische Gebilde (Maschinen, Baugruppen oder Einzelteile), die dieselbe Funktion mit der gleichen Lösung, in mehreren Größenstufen und bei möglichst gleicher Fertigung (...) in einem weiten Anwendungsbereich erfüllen“. Als Typengruppen werden halbähnliche Baureihen bezeichnet, die eine erhebliche Abweichung von der geometrischen Ähnlichkeit aufweisen [123 S. 49]. In Kapitel 5.2 wird die Baureihen- und Typengruppenentwicklung des Pressensystems erörtert. Baukästen sind dadurch gekennzeichnet, dass Bausteine – Maschinen, Baugruppen und Einzelteile – mit oft verschiedenen Lösungen durch Kombinationen unterschiedliche Gesamtfunktionen erfüllen [95 S. 839].

Module und Baugruppen sind in der Literatur nicht eindeutig voneinander abgegrenzt, wie RAPP [123 S. 51f] und SCHUH [124 S. 128] zeigen. Um beide Begriffe voneinander zu unterscheiden, wird sich der Definition von KOLLER [130 S. 111f] angeschlossen. Die Modular-Bauweise ist dadurch gekennzeichnet, dass durch den Zusammenbau der Bausteine nur ein bestimmtes Produkt hergestellt werden kann. Baukästen hingegen erlauben den Zusammenbau verschiedener Produkte eines Produktbereiches. Module werden gebildet, um produktionsinterne Effekte wie eine vereinfachte Fertigung und Beschaffung zu erreichen [128 S. 70], während Baukästen die Attraktivität des Produktes aus Kundensicht erhöhen sollen.

Eine weitere Kategorie der Produktstrukturierung stellen Pakete dar. Pakete sind Kombinationen von Anbauteilen für bestimmte Ausstattungen und Funktionen, die nur in Verbindung miteinander, nicht jedoch in einem anderen Paket zusammengestellt werden. Sie dienen damit der Beschränkung der Kombinationsmöglichkeiten von Anbauteilen und Ausstattungen. [123 S. 53] [124 S. 128f]

Eng mit der Produktstrukturierung verknüpft ist auch das Prinzip der Plattformkonzepte. Diese erweitern den Umfang der Produktstrukturierung über das Produkt hin zu einer Produktfamilie, deren Komponenten, Schnittstellen und Funktionen langfristig über den Produktlebenszyklus des einzelnen Produktes hinaus reichen. [124 S. 132f]

Eine weitere Klassifikation von Produktstrukturen erläutert GÖPFERT [131 S. 107]. In dieser Quelle wird der Grad der Funktionsintegration und der physischen Abhängigkeit der Komponenten betrachtet. Die Ausprägung der funktionalen und physischen Unabhängigkeit der Komponenten wird hier als Modularität bezeichnet. Abbildung 2.21 veranschaulicht diesen Zusammenhang.

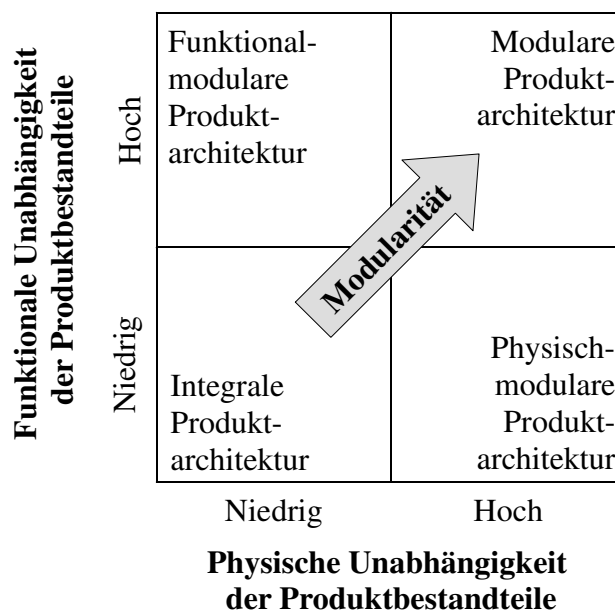


Abbildung 2.21: Modularität nach GÖPFERT [131 S. 107]

Eine hohe Modularität begünstigt die Erweiterung des Produktes, außerdem können Kosten in der Teilebeschaffung, Fertigung und Montage gesenkt werden. Modulare Strukturen vereinfachen die Aufteilung der Entwicklungsarbeit. Daneben werden Entwicklungszeiten verkürzt, indem Neukonstruktionen durch Kombinationen und Anpassungen bestehender Produkte ersetzt werden. Andere Vorteile betreffen weitere Abteilungen: Die Materialwirtschaft profitiert von einer geringeren Teilezahl durch vereinfachte Kommissionierarbeit und Ersatzteilverhaltung, der Vertrieb kann auf bestehendes Produktwissen zurückgreifen. Dabei unterstützt der modulare Produktaufbau das Concurrent Engineering [95 S. 819], die Zusammenarbeit bei Teilentwicklungen, da Aufgaben abgegrenzt und gemeinsame Schnittstellen festgelegt werden. Demgegenüber stehen der erhöhte Schnittstellenaufwand, ein erhöhtes Risiko bei Fehlern und die Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit des Produktes von den Eigenschaften der einzelnen Module. Möglicherweise erlaubt die Kombination von Standard-Modulen kein optimales Ergebnis. Es besteht außerdem die Gefahr, dass technische Neuerungen nicht mit den bislang bestehenden Modulen oder Schnittstellen kompatibel sind und daher nicht genutzt werden können. [131 S. 116, 121]

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

3.1 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines wandlungsfähigen Pressensystems mit Servospindelantrieb für die Komplettbearbeitung von kleinen Blechteilen. Das Pressensystem soll durch seine Eigenschaften und den Aufbau in der Lage sein, verschiedene Fertigungsverfahren wie Schneiden, Umformen und Fügen mit prozessangepassten Stößelbewegungsprofilen im Verbund auszuführen. Eine Anpassung an die teilespezifische Abfolge von Teilprozessen sowie die Änderung der Abfolge soll damit möglich sein. Weiterhin soll das Pressensystem schnell umrüstbar, aber auch flexibel anpassbar und erweiterungsfähig sein. Dadurch sollen für eine Komplettbearbeitung weitere Fertigungsverfahren integriert werden können. Das Pressensystem soll somit an die Anforderungen verschiedener, auch gegensätzlicher Prozesse angepasst werden können. Durch prozessangepasste Stößelbewegungsprofile, die wandelbare Anordnung von Teilprozessen, eine verbesserte Prozessüberwachung und -steuerung sowie eine Optimierung dynamischer Eigenschaften sollen Zykluszeiten verkürzt und die Teilequalität verbessert werden. Davon profitieren die Produktivität und die Wirtschaftlichkeit. Das zu entwickelnde Pressensystem soll dem Anwender im Vergleich zu bisher genutzten Pressen weitreichende Vorteile bringen. Dazu gehören:

- ein Servospindelantrieb, der ein prozessangepasstes Stößelbewegungsprofil für einzelne Teilprozesse ermöglicht; um dies bei Prozessketten nutzen zu können, muss es möglich sein, Teilprozesse oder Teilprozessgruppen zu separieren,
- positionier- und koppelbare Pressenmodule, die eine wandelbare Anordnung von Teilprozessen ermöglichen, deren Stößel sowohl unabhängig voneinander als auch synchron verfahrbar sind; die Kopplung von Pressenmodulen ermöglicht eine Erhöhung der Presskraft für den Teilprozess, die Entkopplung von Pressenmodulen erlaubt prozessangepasste Stößelbewegungsprofile für separierte Teilprozesse oder Teilprozessgruppen,
- ein flexibler Aufbau, der die Erweiterung des Pressensystems durch Integration zusätzlicher Prozesse vereinfacht; hierbei erleichtern abgrenzbare Teilprozesse das bedarfsgerechte Ein- und Auswechseln von Zusatzprozessen,
- eine erweiterungsfähige Prozesssteuerung und -überwachung durch integrierte Sensoren, die durch weitere Messsysteme ergänzt werden kann,
- ein Werkzeugwechselsystem, das kurze Rüst- und Einrichtzeiten sowie die wandelbare Anordnung von Teilprozessen ermöglicht.

Schwerpunkt der Arbeit ist die Konstruktion und Modularisierung mechanischer Komponenten des Pressensystems. Das Pressensystem wurde im Rahmen des AiF-Projektes „Entwicklung eines modularen Pressensystems für die Verkettung von Schneid-, Umform- und Fügeprozessen mit dem Ziel der Komplettbearbeitung“ entworfen und entwickelt. Projektpartner waren die Firma Promess Gesellschaft für Montage- und Prüfsysteme mbH aus Berlin und die Brandenburgische Technische Universität (BTU) Cottbus-Senftenberg.

3.2 Lösungsidee

Aus der Zielsetzung wird eine erste Lösungsidee abgeleitet: Ein modular aufgebautes Pressensystem besteht aus mehreren Pressenmodulen mit Servospindelantrieb, die auf einem gemeinsamen Untergestell verfahren und automatisiert zueinander positioniert werden können. Den schematischen Aufbau des zu entwickelnden Pressensystems zeigt Abbildung 3.1. Im Rahmen der Untersuchungen des Standes der Erkenntnisse in Kapitel 2.1.5 wurden keine Servopressen gefunden, die dieser Lösungsidee entsprechen.

Zur Bearbeitung wird das im Coil (1) gespeicherte Blechband durch mehrere auf einem gemeinsamen Grundgestell (2) angeordnete Pressenmodule (3) geleitet. Jedes Pressenmodul ist unabhängig von den anderen Pressenmodulen in Teiledurchlaufrichtung innerhalb des Pressensystems positionierbar. Die Pressenmodule sind mit einem oder mehreren Servospindelantrieben (4) ausgerüstet, deren kinetische Energie über den Pressenstößel (5) und die Werkzeugspannplatten (6) an das Werkzeug (7) geleitet wird. Werkzeuge können von einem oder mehreren Pressenmodulen angetrieben werden. Das Positionieren der Pressenmodule erlaubt eine Nutzung von Werkzeugen, die in Teiledurchlaufrichtung über das Pressenmodul herausragen. Zur Steuerung, Regelung und Überwachung werden in jedem Pressenmodul Sensoren zur Weg- und Kraftmessung verbaut.

a) Pressensystem

- 1 Coil
- 2 Grundgestell
- 3 Pressenmodul
- 4 Servospindel-
antrieb
- 5 Pressenstößel
- 6 Werkzeug-
spannplatten
- 7 Werkzeug

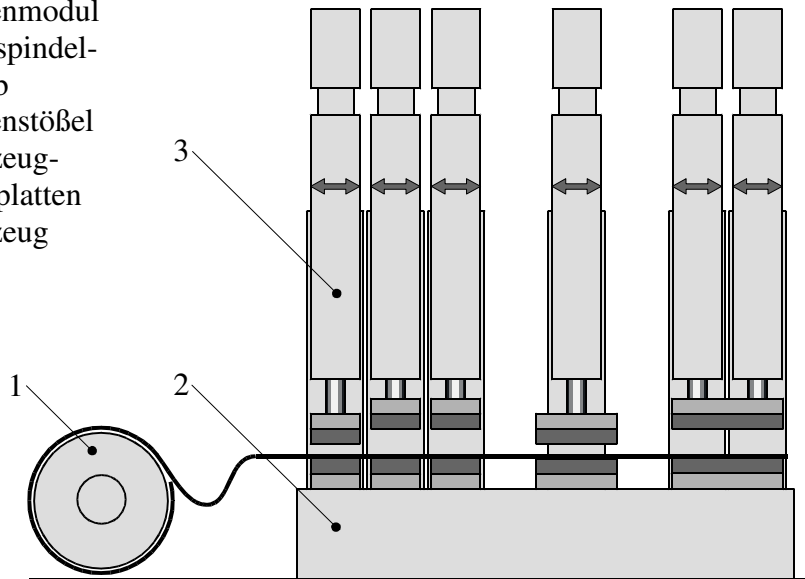
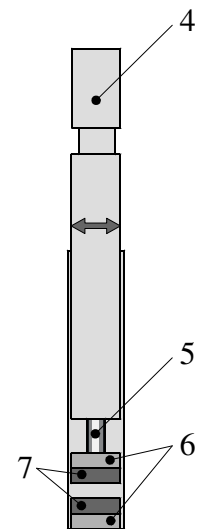
**b) Pressenmodul**

Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau des Pressensystems und eines Pressenmoduls

3.3 Vorgehensweise

Grundlage dieser Arbeit bildet die Untersuchung des Standes der Erkenntnisse, der thematisch in die beiden Kapitel Pressentechnik und Produktentwicklung untergliedert ist. Die Untersuchung des Standes der Pressentechnik, insbesondere der Servo- und Servospindelpressen, soll bestehende Defizite offenlegen und an geeignete Lösungen heranzuführen. In den folgenden Kapiteln wird der Entwicklungsprozess des Pressensystems eingehend erläutert. Dabei wird auf Erkenntnisse aus der Untersuchung des Standes der Pressentechnik aus Kapitel 2.1 zurückgegriffen und die in Kapitel 2.2 beschriebenen Methoden zur Produktentwicklung werden angewendet. Der Entwicklungsprozess wird in die Phasen Anforderungsfindung, Konzeptfindung und Entwurfsfindung gegliedert. Zur Überprüfung der Funktionalität des entwickelten Pressensystems wird aus dem Entwurf ein Prototyp ausgearbeitet. Im Anschluss werden Maßnahmen zur Produktstrukturierung durchgeführt, aus denen die Weiterentwicklung des Entwurfes zu einer Baureihe bzw. Typengruppe und einem Baukastensystem resultiert. Zum Abschluss dieser Arbeit wird das Pressensystem bewertet, sein Einsatzspektrum beschrieben und das Pressensystem innerhalb bestehender Pressen eingeordnet.

4 Entwicklung des Pressensystems

Dieses Kapitel erläutert den Entwicklungsprozess des Pressensystems. Aus den gesammelten Anforderungen entsteht ein Konzept, welches in einem Entwurf präzisiert wird. Schwerpunkt sind dabei die mechanischen Komponenten des Pressensystems. Durch Ausarbeiten des Entwurfes werden die für den Bau eines Prototyps notwendigen Dokumente erstellt. Außerdem wird die Weiterentwicklung des Pressensystems als Baukasten vorgesehen, in der Entwurfsfindung wird daher ein modularer Aufbau des Systems verfolgt. Im folgenden Kapitel 5 wird anschließend die Weiterentwicklung des Pressensystems zu einer Baureihe bzw. Typengruppe und einem Baukastensystem beschrieben.

4.1 Vorgehensweise bei der Entwicklung

Abbildung 4.1 zeigt die Methodik der Produktentwicklung nach der VDI 2221 [88] und verweist auf die Unterkapitel dieser Arbeit, in denen die Methoden und Ergebnisse des Entwicklungsprozesses behandelt werden. Zu Beginn der Produktentwicklung des Pressensystems werden alle Anforderungen an das zukünftige Produkt gesammelt und in einer Anforderungsliste nach Forderungen und Wünschen unterschieden. Im Anschluss daran wird das Konzept aufgestellt. Zur Einleitung der Konzeptphase wird auf Grundlage der Anforderungsliste das wesentliche Problem des Produktes formuliert. Darauf basierend werden Gesamt- und Teilfunktionen abgeleitet und diese bis zu einer Funktionsstruktur mit den Stoff-, Energie- und Signalflüssen abstrahiert. Im nächsten Schritt werden Wirkprinzipien zur Erfüllung der Teilfunktionen gesammelt. Zu diesem Zweck werden verschiedene konventionelle, intuitiv betonte und diskursiv betonte Methoden genutzt. Mit Auswahllisten werden einfache Entscheidungsaufgaben über die Weiterverfolgung der Wirkprinzipien getroffen, komplexe Entscheidungen werden mittels einer technisch-wirtschaftlichen Bewertung nach der VDI 2225-3 [111] herbeigeführt. Durch die Auswahl und Verknüpfung der Wirkprinzipien und weiteren Konkretisierungsschritten wird die umzusetzende Prinzipielle Lösung festgelegt, welche die Konzeptphase abschließt. Die darauffolgende Ableitung des Entwurfes beginnt mit einer Gliederung des Konzeptes in realisierbare Module. Diese werden, beginnend mit den maßgebenden Modulen, ausgestaltet, infolgedessen Vorentwürfe abgeleitet werden. Die Vorentwürfe werden durch eine Detaillierung und durch das Ergänzen der Ausgestaltung der noch fehlenden Module zu einem Gesamtentwurf erweitert, welcher die wesentlichen Gestaltmerkmale des Pressensystems beinhaltet. Wichtige Funktionen des Pressensystems werden zum Abschluss der Produktentwicklung anhand eines Prototyps überprüft, der durch die Ausarbeitung des Entwurfes produziert werden kann.

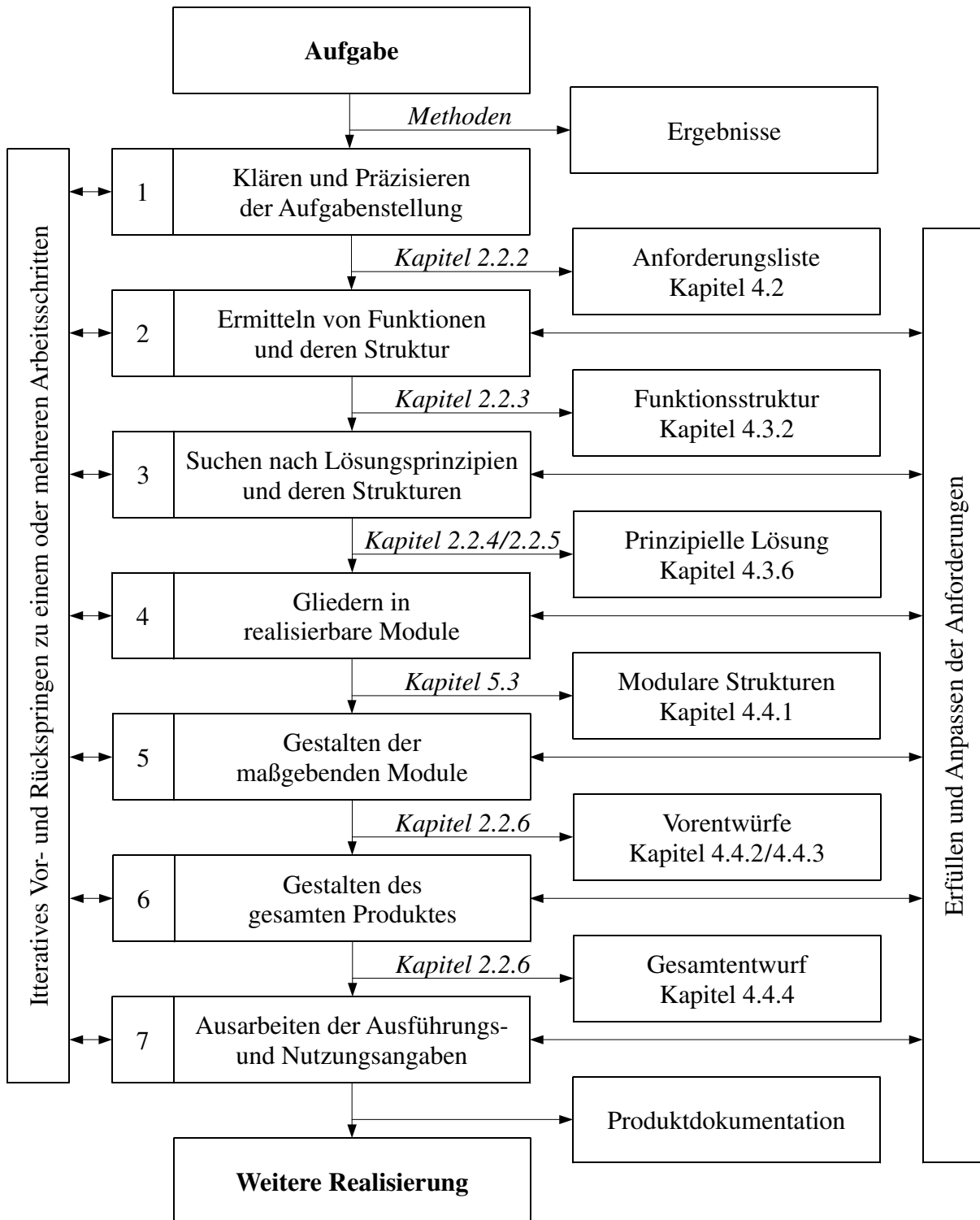


Abbildung 4.1: Konstruktionsmethodik nach VDI 2221 [88]

4.2 Zusammenstellen der Anforderungen

Da das Pressensystem ohne bestehenden Abnehmer entwickelt wird, kann nicht auf konkrete Kundenanforderungen zurückgegriffen werden. Um Anwender und Lead User zu finden und möglichst vielfältige Anforderungen zusammenzutragen, wurde die Idee des wandlungsfähigen, modularen Pressensystems in Veröffentlichungen, Vorträgen und auf Messen präsentiert. Die Anforderungen an das Pressensystem werden durch Markt- und Konkurrenzuntersuchungen sowie einer Analyse der Produktumgebung aufgestellt und durch Einzelwünsche potenzieller Anwender aus dem Umfeld der Blechbearbeitung ergänzt. Da das Konzept des Pressensystems neuartig ist, müssen einige Anforderungen antizipiert werden. Ohne einen Kunden existiert auch kein Lastenheft im eigentlichen Sinn. Dies birgt wie bei allen Neuentwicklungen die Gefahr, dass Kundenbedürfnisse nicht erkannt werden und daher das neue Produkt keinen Absatz findet. Aus diesem Grund ist es bei der Anforderungsfindung des Pressensystems von großer Bedeutung, die vom Markt gewünschten Produktmerkmale zu antizipieren. Außerdem sollen durch Maßnahmen wie der Ableitung einer Baureihe bzw. Typengruppe und einem Baukastensystem möglichst viele Eigenschaften wandelbar gestaltet werden. So können über Anpassungen auch Kunden erreicht werden, deren Anforderungen sich bislang nicht mit den technischen Eigenschaften des Pressensystems decken. Die Anforderungsliste des Pressensystems ist ergänzt durch eine Quellenangabe der einzelnen Anforderungswerte. Bei mehreren Quellen wird nur eine Quelle genannt und dies gekennzeichnet. Gibt es zu einer Anforderung Sach- und Personenquellen, so werden beide Kennungen verwendet. Zur Unterscheidung erhalten Personenquellen Großbuchstaben, Sachquellen werden in Kleinbuchstaben angegeben. Die Anforderungsliste wird in folgende Kategorien unterteilt:

- Geometrie
- Kinematik und Kinetik
- Energie
- Ausstattung
- Kosten
- Funktionen:
 - Softwarefunktionen
 - Einrichtbetrieb
 - Betrieb
 - Wartung
- Termine
- Signale
- Sicherheit
- Ergonomie
- Fertigung und Montage
- Transport
- Instandhaltung
- Recycling
- Werkstoffe

Die Kategorien sind einer Hauptmerkmalliste [95 S. 330] entnommen, die auch als Grundlage einer Leitlinie für weitere Entwicklungsschritte dient. In Kapitel 2.2.6 wird diese Leitlinie für das Gestalten von Produkten erläutert. Obwohl sich die Terminanforderungen nicht direkt auf das Entwicklungsergebnis auswirken, wurden sie schon in die Anforderungsliste übernommen, um als Grundlage für die Detaillierung des Projektzeitplans zu dienen. Einen Auszug der Anforderungsliste zeigt Abbildung 4.2.

Anforderungsliste Pressensystem					
Ersteller: Wasielewski/Berding			Version: 07 Datum: 08.11.2013		
Personenquellen Kennung Name (Firma) A Prof. Viehweger (BTU) B J. Wasielewski (BTU) C Dr. Lechler (Promess) D Dr. Grützner (Promess) (...) (...) * Mehr als eine Personenquelle			Sachquellen Kennung Bezeichnung a Maschinenrichtlinie 2006/42/EG b DIN EN 692 c VDI 2242 d DIN 323 (...) (...) ** Mehr als eine Sachquelle		
Nr.	Letzte Ände- rung	F W	Anforderung	Wert	Quelle
1. Geometrie					
1.1	18.01.12	F	Anzahl Pressenmodule	>6	A
1.2	18.01.12	W	Achsabstand	<200 mm	A
1.3	18.01.12	F	Stößelhub	350 mm	C*
(...)					
2. Kräfte, Kinematik und Kinetik					
2.1	18.01.12	F	Nennkraft kleinstes Modul	30 kN	C*
2.2	18.01.12	F	Zykluszeit (Hub 100 mm, Bearbeitungsweg 3 mm)	0,5 s	C*
(...)					
4. Ausstattung					
4.1	08.11.13	W	Horizontales Positionieren: Wegmesssystem	ja	D
4.2	18.01.12	W	Horizontales Positionieren: automatisiert	ja	D*
4.3	18.01.12	F	Werkzeug spannen: automatisiert	ja	D*
(...)					

F... Forderung

W... Wunsch

Abbildung 4.2: Auszug aus der Anforderungsliste

4.3 Aufstellen des Konzeptes

Nachdem im vorherigen Kapitel die Anforderungen zusammengetragen wurden, wird in der Konzeptfindung die Prinzipielle Lösung zur Erfüllung der Anforderungen zusammengetragen. Zu diesem Zweck werden Probleme und Funktionen herausgestellt, verallgemeinert und strukturiert sowie geeignete Wirkprinzipien gesucht. Durch eine Auswahl und Strukturierung der Wirkprinzipien wird die Prinzipielle Lösung festgelegt.

4.3.1 Formulieren des grundsätzlichen Problems

Im ersten Schritt der Konzeptphase werden die Anforderungen aus der Anforderungsliste verallgemeinert und lösungsneutral formuliert. Dazu wird die Anforderungsliste analysiert und wesentliche Fragestellungen nach Funktionen und Wirkungen werden erarbeitet. Eine Formulierung wie:

6 bis 15 Pressenmodule mit je zwei 15 kN-Servospindelantrieben sollen über Zahnstangen mit 20 mm/s horizontal verfahrbar auf einem Pressentisch montiert werden, um Blech zu bearbeiten.

wäre für die Beantwortung grundsätzlicher Fragen unnötig detailliert und würde andere Lösungen als die des Antriebes über Zahnstangen ausschließen. Sie ist daher ungeeignet für eine lösungsneutrale Produktentwicklung. Daher wird die grundlegende Aufgabenstellung an die Entwicklung des Pressensystems folgendermaßen formuliert:

Aufeinanderfolgende Einzelpressen sollen in Teiledurchlaufrichtung automatisiert positioniert werden können, sodass ihre Werkzeuge sowohl unabhängig voneinander als auch gemeinsam bewegt Halbzeuge bearbeiten und fügen können.

Diese Formulierung beinhaltet nur die Anforderung nach dem Positionieren der Pressenmodule und die Möglichkeit, die Pressenantriebe mehrerer Pressenmodule miteinander zu synchronisieren. Quantitative Merkmale und spezielle Kennzeichen der Komponenten sowie allgemeingültige Erwartungen wie die nach Maschinensicherheit werden aus dieser Aufgabenstellung ausgeblendet. Dadurch soll es im weiteren Vorgehen möglich sein, Teilprobleme auch durch neue, möglicherweise besser geeignete, Assoziierungen und Lösungen zu lösen.

4.3.2 Aufstellen der Funktionsstruktur

Aus der Perspektive des Maschinenanwenders lässt sich das Pressensystem als Black-Box darstellen, wie Abbildung 4.3 zeigt.



Abbildung 4.3: Darstellung des Pressensystems als Black-Box

Aus Sicht des Maschinenentwicklers genügt die Black-Box-Darstellung nicht, um ein System hinsichtlich seiner Funktionen und deren Zusammenwirken zu strukturieren. Zu diesem Zweck wird eine Funktionsstruktur in Form eines Flussdiagramms erstellt. Vor der Erstellung der Funktionsstruktur wird das Pressensystem, wie Abbildung 4.4 darstellt, in die Teilsysteme Pressenmodul und Pressenmodul-Positionierung gegliedert.

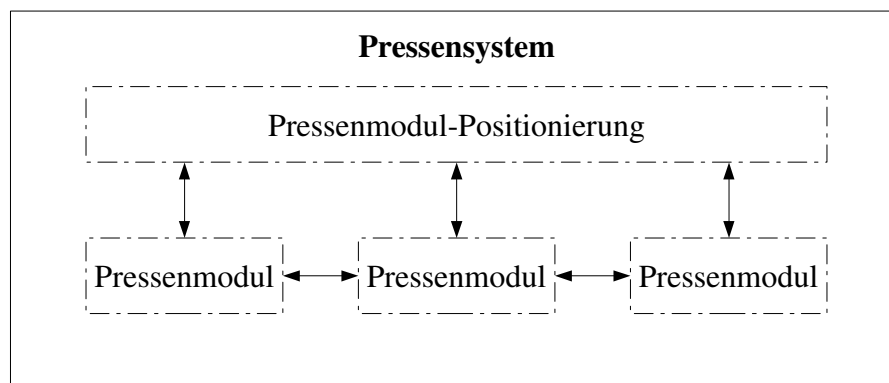


Abbildung 4.4: Systemstruktur

Das Teilsystem Pressenmodul-Positionierung bildet das horizontale Verfahren der Pressenmodule in Durchlaufrichtung der Bauteile ab. Die funktionellen Wechselwirkungen der Pressenmodule untereinander und zur Pressenmodul-Positionierung werden anschließend in der Funktionsstruktur konkretisiert. Hierfür wird die in Abbildung 4.5 gezeigte Symbolik verwendet, welche die Gesamt- und Teilfunktionen des Pressensystems sowie die Stoff-, Signal- und Energieflüsse veranschaulicht. Die Gesamtfunktion des Pressensystems und die Teilfunktion der Teilsysteme Pressenmodul und Pressenmodul-Positionierung werden aus der Formulierung des grundsätzlichen Problems im vorherigen Kapitel 4.3.1 abgeleitet.

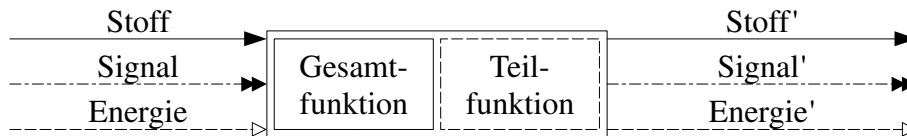
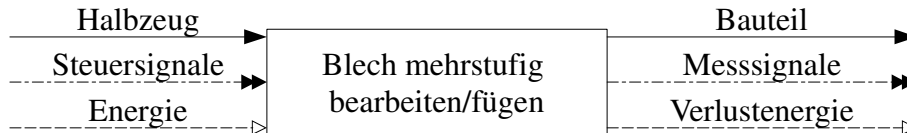
a) Allgemeine Darstellung von Funktionen**b) Gesamtfunktion des Pressensystems****c) Teilfunktion des Pressenmoduls****d) Teilfunktion der Pressenmodul-Positionierung**

Abbildung 4.5: Darstellungen von Funktionen

Da es sich bei dem zu entwickelnden Pressensystem für die Blechbearbeitung um eine Weiterentwicklung eines bekannten Systems für Füge- und Montageaufgaben handelt, wird die Funktionsstruktur durch eine Analyse bekannter Systeme ermittelt. In diesem Ansatz werden bekannte Systeme in ihre Komponenten aufgegliedert und deren Aufgaben beschrieben [94 S. 251]. Den Aufgaben werden Teilfunktionen zugeordnet, welche wiederum den Allgemeinen Funktionen aus Abbildung 2.15 in Kapitel 2.2.3 zugewiesen werden. Das bekannte System zum Ermitteln der Funktionen des Teilsystems Pressenmodul ist der allgemeine Aufbau einer Servospindelpresse, wie er in Abbildung 2.12 in Kapitel 2.1.8 skizziert ist. Abbildung 4.6 zeigt die Teilfunktionen, welche sich aus der Analyse der bekannten Servospindelpresse ableiten lassen. Zusätzlich werden notwendige und mögliche Verknüpfungen der Teilfunktionen zu den Allgemeinen Funktionen dargestellt.

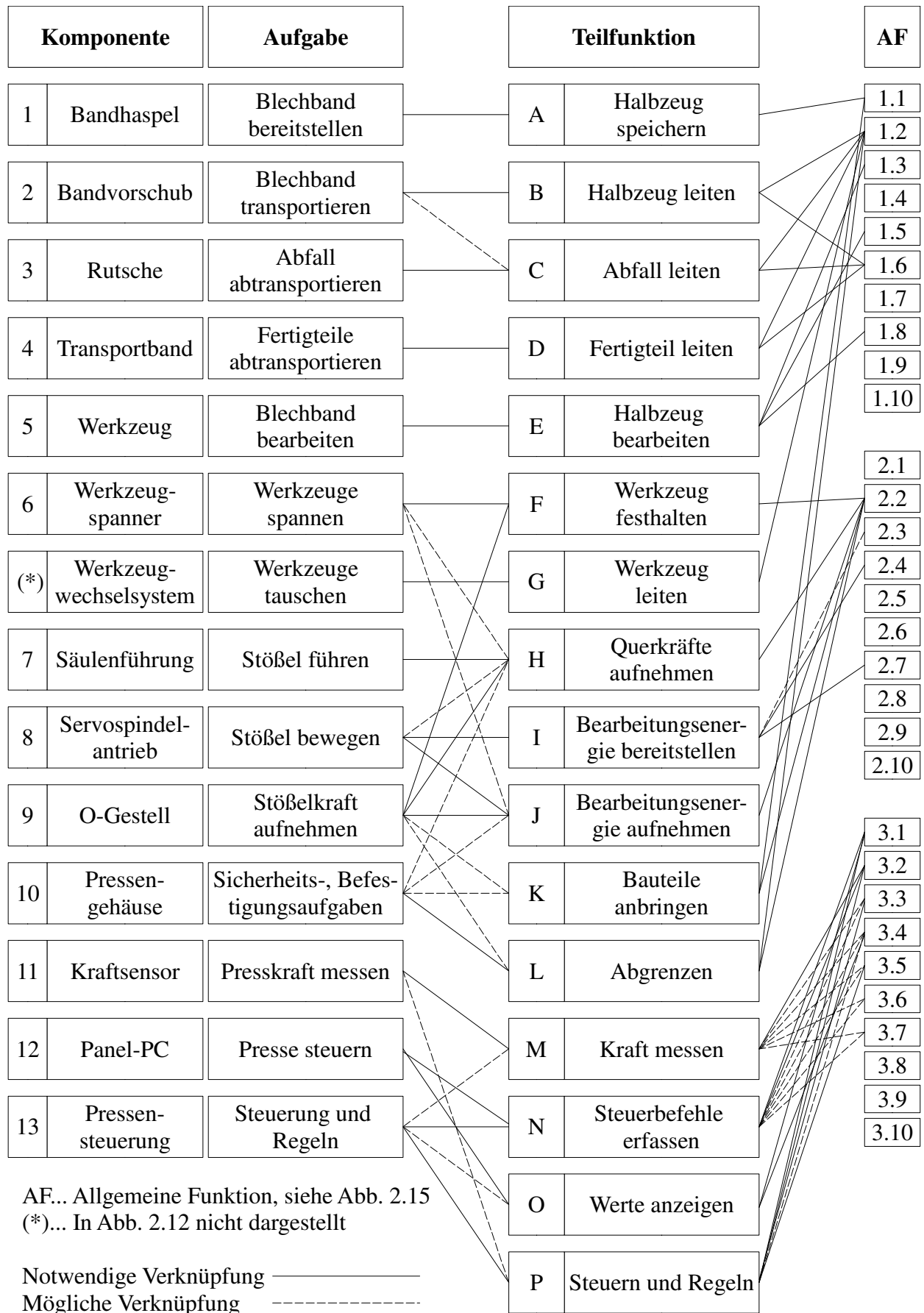


Abbildung 4.6: Ermittlung der Teilfunktionen des Pressenmoduls

Die Formulierung des grundsätzlichen Problems in Kapitel 4.3.1 fordert Pressenmodule, die in Teiledurchlaufrichtung frei positioniert werden können. Da Pressen im Allgemeinen mit dem Fundament fest verbunden sind, ist diese Funktion eine Neuheit, die durch das Teilsystem Pressenmodul-Positionierung abgebildet wird. Wieder dient die Analyse eines bekannten Systems mit gleicher Grundfunktion dem Ermitteln der Teilfunktionen dieses Teilsystems. Zu diesem Zweck wird die Eignung einer Fräsmaschine in Fahrständerbauweise [5 S. 172] als bekanntes System untersucht. Diese Maschinen bestehen aus einem Werkzeugträger, der auf einem Maschinenbett von drei Achsen angetrieben wird. Analog zum Werkzeugträger bei der Fahrständerfräsmaschine sollen beim Pressensystem die Pressenmodule bewegt werden. Abbildung 4.7 vergleicht eine Fahrständerfräsmaschine und das Teilsystem Pressenmodul-Positionierung hinsichtlich für die Funktionsableitung bedeutsamer Eigenschaften.

Fahrständerfräsmaschine		Pressenmodul-Positionierung
Fräswerkzeugträger	Zu bewogender Aufbau	Pressenmodul
Ein Aufbau	Anzahl der Aufbauten	Mehrere Aufbauten
Horizontal	Bewegungsrichtung des Aufbaus	Horizontal
Auf mit Bett fest verbundenen Tisch	Werkstückposition	Innerhalb der Pressenmodule

Abbildung 4.7: Vergleich einer Fahrständerfräsmaschine mit der Pressenmodul-Positionierung

Der Vergleich zeigt, dass Fahrständerfräsmaschinen grundsätzlich geeignet sind, um aus ihrem Aufbau Teilfunktionen für das Teilsystem Pressenmodul-Positionierung abzuleiten. Es treten zwar Unterschiede in der Art und Anzahl des zu bewogenden Objektes und in der Werkstückposition auf, allerdings haben diese keinen Einfluss auf die gesuchte Funktion, dem Positionieren der Pressenmodule. Beachtet werden muss allerdings, dass im Gegensatz zur Fahrständerfräsmaschine mehrere Aufbauten auf gleicher Achse bewegt werden sollen. Abbildung 4.8 zeigt den für die Funktionssuche relevanten Aufbau einer Fahrständerfräsmaschine, die Herleitung der Funktionen für das Teilsystem Pressenmodul-Positionierung sowie die Zuordnung zu den Allgemeinen Funktionen aus Abbildung 2.15 in Kapitel 2.2.3.

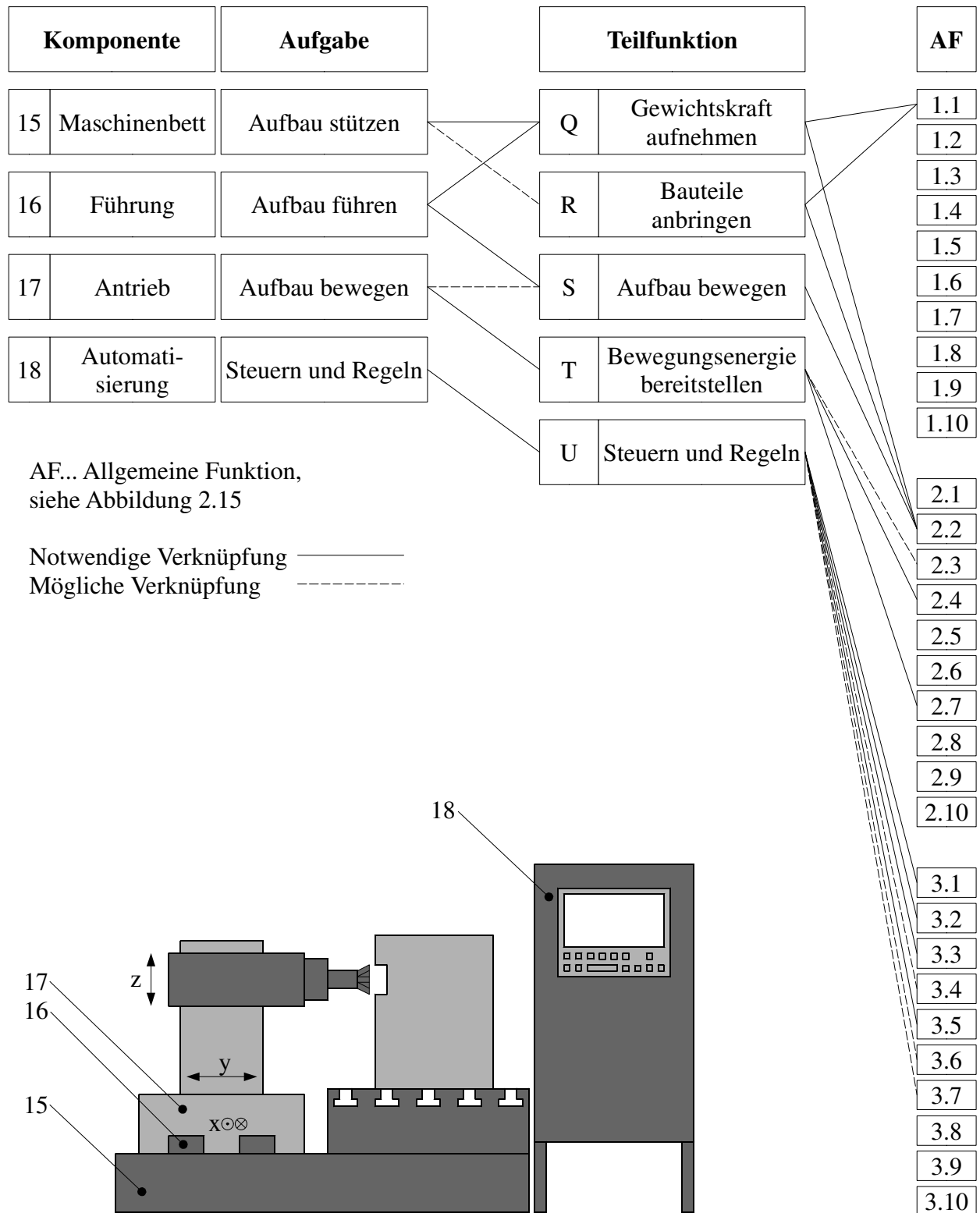


Abbildung 4.8: Ermittlung der Teilfunktionen der Pressenmodul-Positionierung

Durch eine vergleichende Analyse mit bestehenden Systemen konnten für das Pressensystem 21 Teilfunktionen A bis U aufgelistet werden. Der Detaillierungsgrad der einzelnen Teilfunktionen hängt von ihrer Bedeutung für die mechanische Konstruktion des Pressensystems ab. Aus den in Abbildung 4.6 gefundenen Teilfunktionen des Pressenmoduls wird dessen Funktionsstruktur in Abbildung 4.9 abgeleitet. Die auf Abbildung 4.8 zurückgehende Funktionsstruktur für die Pressenmodul-Positionierung zeigt Abbildung 4.10.

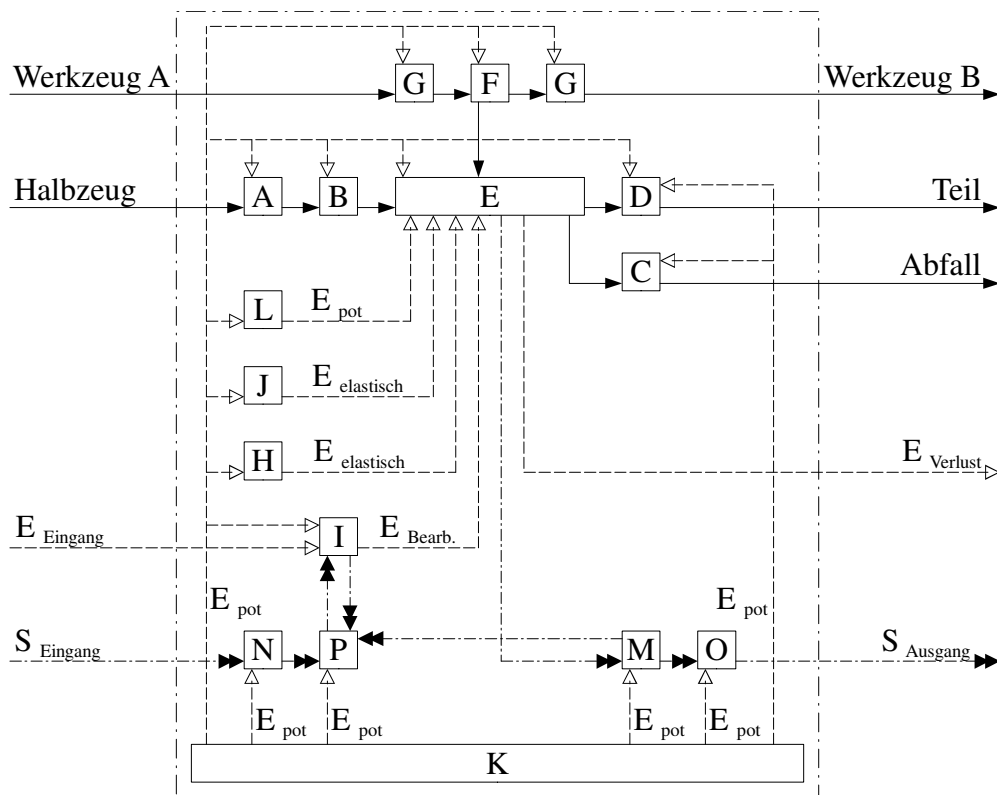


Abbildung 4.9: Funktionsstruktur des Pressenmoduls

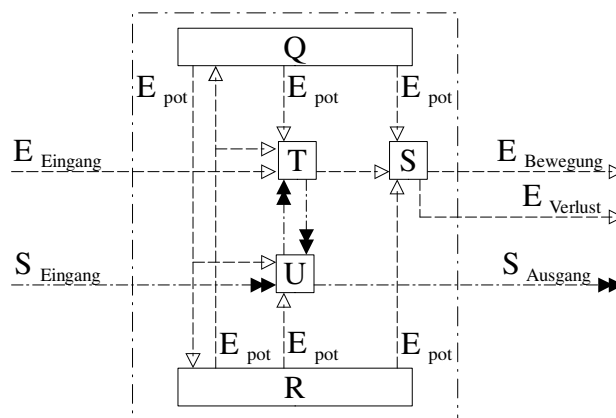


Abbildung 4.10: Funktionsstruktur der Pressenmodul-Positionierung

Das Zusammenwirken aller Teilfunktionen ist in der Funktionsstruktur des Pressensystems in Abbildung 4.11 nachgebildet. Das Halbzeug wird durch die Pressenmodule geleitet und innerhalb der Pressenmodule in den auswechselbaren Werkzeugen durch Umwandlung der von außen zugeführten Energie $E_{Eingang}$ bearbeitet. Neben den Fertigteilen entsteht energetischer Verlust $E_{Verlust}$ und stofflicher Abfall. Die Bearbeitungsenergie $E_{Bearb.}$ wird mittels der Eingangssignale $S_{Eingang}$ durch Steuern und Regeln angepasst. Die gemessenen Werte und weitere Steuer-, Regel- und Prozessparameter bilden die Ausgangssignale $S_{Ausgang}$. Die Anzahl der Pressenmodule ist variabel, in der Funktionsstruktur des Pressensystems sind die Teilfunktionen von drei Pressenmodulen dargestellt. Im weiteren Entwicklungsverlauf wird die Funktionsstruktur angepasst, so werden beispielsweise die Energieformen festgelegt oder mögliche Verknüpfungen der Signale ergänzt.

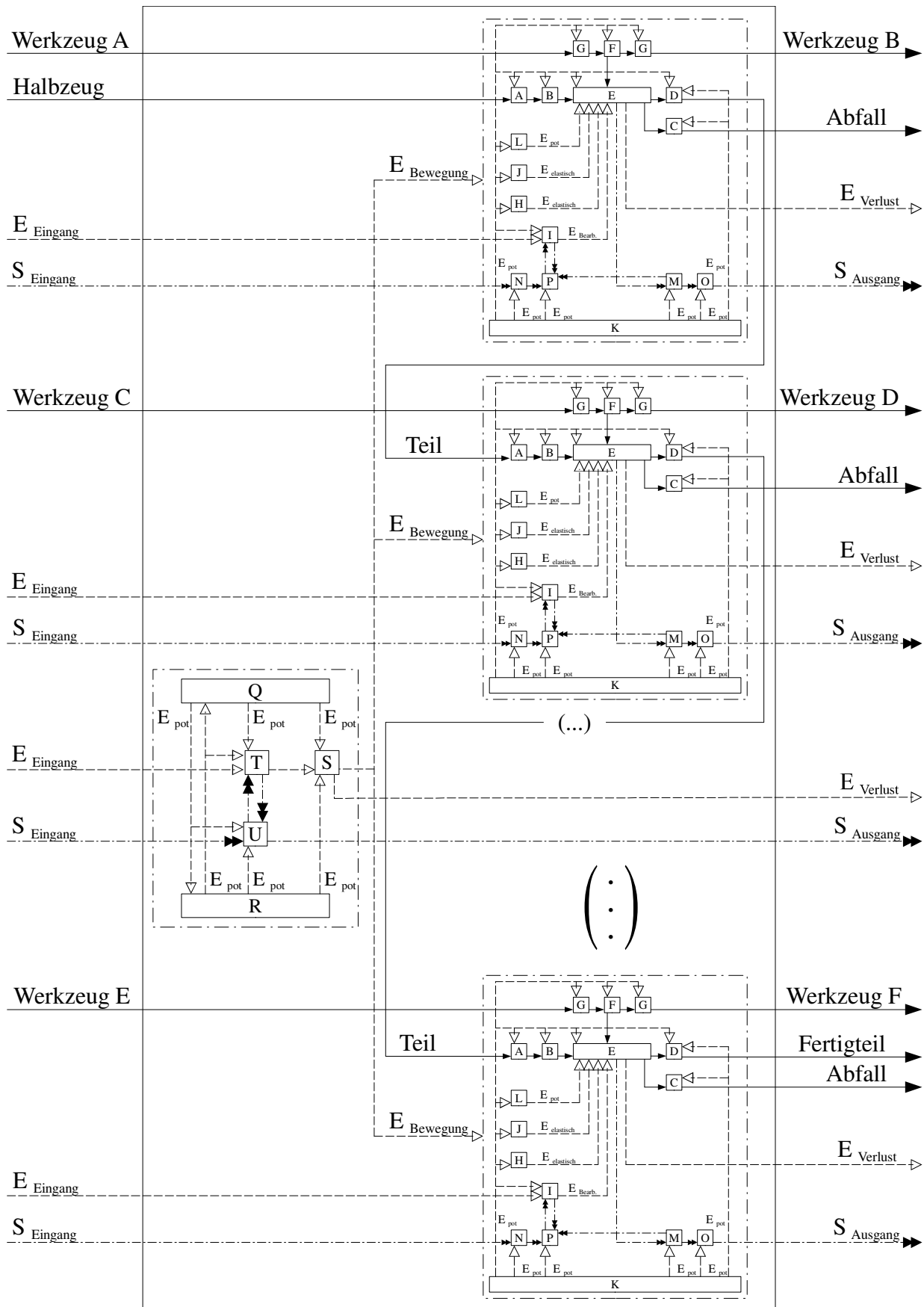


Abbildung 4.11: Funktionsstruktur des Pressensystems

4.3.3 Finden der Wirkprinzipien

Im Anschluss an die Ableitung der Funktionsstruktur werden Wirkprinzipien zur Erfüllung der Teilfunktionen gesammelt und strukturiert. Dabei werden möglichst viele grundsätzlich nutzbare Lösungen für die verschiedenen Teilfunktionen ermittelt. Wie beim Finden der Gesamt- und Teilfunktionen wird wieder stark abstrahiert, um vielfältige Lösungen zu identifizieren und neuartige Lösungen nicht zu übersehen.

Finden der Wirkprinzipien für die Teilfunktion „Bearbeitungsenergie aufnehmen (J)“

Das Wirkprinzip, die Bearbeitungsenergie durch ein Gestell aufzunehmen, ist offenkundig. Allerdings sind Geometrie und Werkstoff des Gestells keinesfalls evident. Pressengestelle unterscheiden sich in Form, Bauweise und Werkstoff. Durch eine Recherche des Standes der Technik soll ein geeignetes Gestell für die Pressenmodule gefunden werden. Abbildung 4.12 zeigt verschiedene Formen von Pressengestellen. Verbreitet sind C- und O-Gestelle; E-Gestelle [132] hingegen sind nicht bedeutend. O-Gestell-Pressen werden als einteiliger Monoblock oder mehrteilig gebaut, indem das Kopfstück (1) durch Seitenständer (2) mit dem Pressentisch (4) verbunden ist. Bei kleinen Pressen sind die Seitenständer oft als einfache Säulen ausgeführt, in größeren Pressen sind die Seitenständer durch Zuganker (3) vorgespannt [11 S. 35f] [15 S. 730 & 734]. C-Gestelle werden in Ein- und Doppelständerbauweise gebaut, O-Gestelle in Zweiständer- oder Säulenbauweise [15 S. 756]. Die Gestelle werden durch Gießen oder aus verschweißten Platten gefertigt, außerdem werden größere Pressen aufgrund der Bearbeitungs- und Transportmöglichkeiten mehrteilig gebaut [11 S. 36].

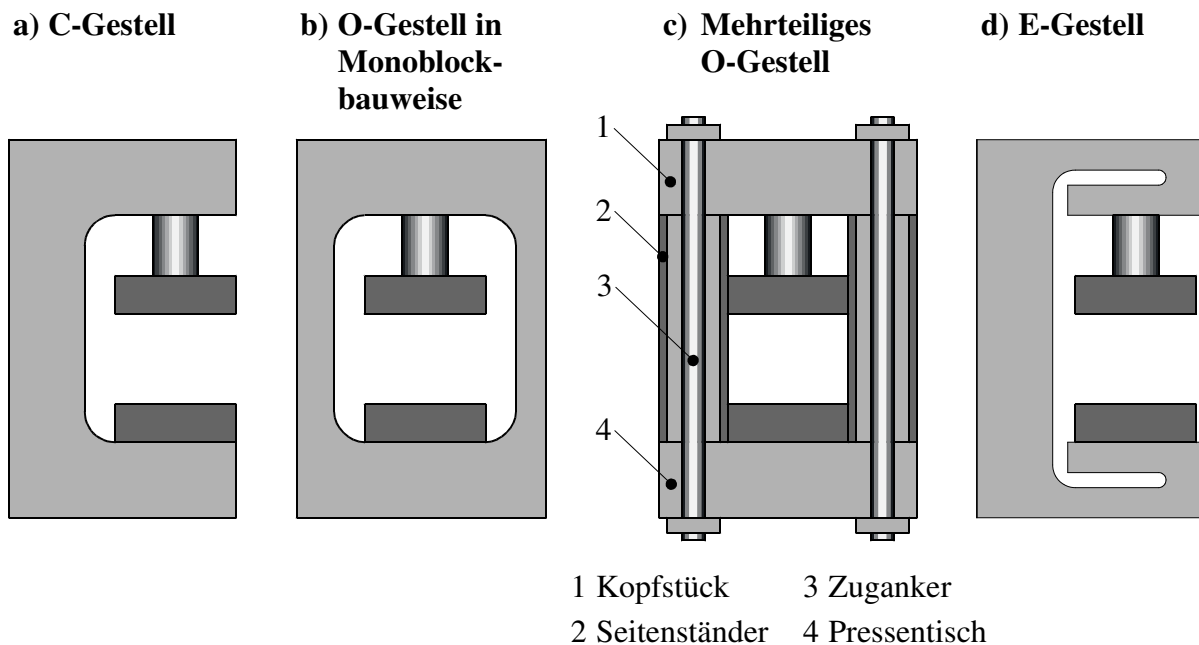


Abbildung 4.12: Bekannte Ausführungen von Pressengestellen

Wegen der seitlich offenen Form sind C-Gestelle besser zugänglich als die seitlich geschlossenen O-Gestelle, nachteilig ist die asymmetrische und besonders große Aufbiegung der C-Gestelle beim Pressen. EHRENSPIEL [133 S. 483f] vergleicht die Kraftflüsse und Materialausnutzung beider Gestelltypen und zeigt auf, dass O-Gestelle leichter bauen als vergleichbare C-Gestelle. Eine parallele Aufbiegung bei seitlicher Zugänglichkeit kennzeichnen E-Gestelle, allerdings sind diese in Lastrichtung weniger steif. Sie müssen in besonderem Maße bezüglich der zulässigen Aufbiegung und der Schwingungen ausgelegt werden. Im Pressenbau übliche Gestelle sind schwer und damit steif gebaut, um Aufbiegung und unerwünschte Schwingungen zu reduzieren. Im Gegensatz zu konventionellen Pressen müssen die Pressengestelle des Pressensystems in Teiledurchlaufrichtung verfahrbar sein. Gesucht werden daher Pressengestelle, die im Rahmen der zulässigen Aufbiegung leicht bauen, um zeit- bzw. energiesparend positioniert zu werden. Neben der geringeren erforderlichen Bewegungsenergie werden durch niedrige Massen höhere Eigenfrequenzen erreicht. Aus der Untersuchung bekannter Pressengestelle lassen sich die in Abbildung 4.13 gezeigten Wirkprinzipien für die Gestelle der Pressenmodule ableiten.

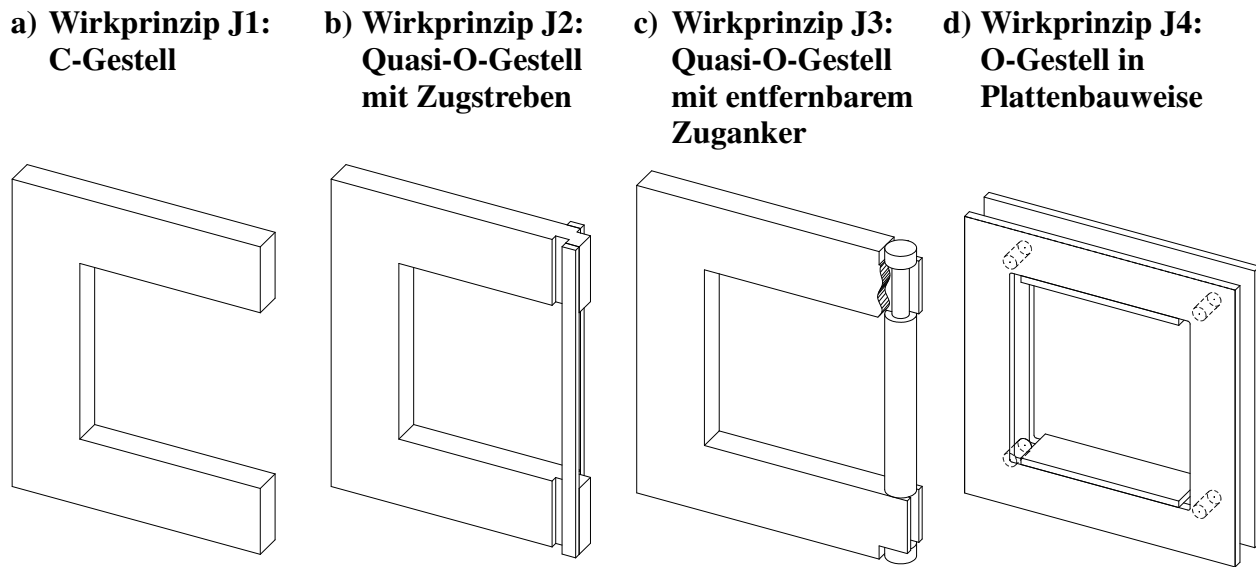


Abbildung 4.13: Wirkprinzipien für die Teilfunktion „Bearbeitungsenergie aufnehmen (J)“

Für das Aufnehmen der Bearbeitungsenergie eignen sich C-Gestelle, die einen seitlichen Zugang in den Pressenraum ermöglichen. Allerdings biegen sich diese beim Pressen weit und mit Winkelversatz auf. Um dem entgegenzuwirken, müssen dickere Gestellplatten als beim geschlossenen O-Gestell verbaut werden. Wird über Anbauteile die offene Seite des C-Gestells wieder geschlossen, sodass über die Anbauteile auch der Kraftfluss geschlossen wird, entstehen Quasi-O-Gestelle mit geringerer (Winkel-)Aufbiegung. Eine Umsetzungsmöglichkeit dazu ist das Quasi-O-Gestell mit Zugstreben. Die abgebildete Ausführung mit in der Tiefebene versetzt angeordneten Zugstreben ermöglicht einen seitlichen Zugang in den Pressenraum bei gleichzeitig verringerter Aufbiegung im Vergleich zum C-Gestell. Außerdem können mehrere Pressenmodule in Teiledurchlaufrichtung aufeinander gefahren werden, wodurch der Abstand zweier aufeinanderfolgender Pressenmodule, das Stichmaß, klein gehalten wird. Eine weitere Umsetzungsmöglichkeit zum Schließen des C-Gestells ist das Quasi-O-Gestell mit herausnehm- und vorspannbarem Zuganker zur Verringerung der (Winkel-)Aufbiegung. Bei Bedarf wird der Zuganker ausgebaut, wodurch der Zugang in den Pressenraum gegeben ist. Zum Pressen wird der Zuganker wieder eingebaut, um die (Winkel-)Aufbiegung zu minimieren. Der Zuganker ist so ausgeführt, dass eine unter Druck vorgespannte Hülse das Rückfedern des unter Last aufgebogenen Gestells bei schlagartigem Abfall der Stößelkraft beim Schneiden dämpft. O-Gestelle mit symmetrischem Aufbau biegen sich beim Pressen parallel auf, wenn die Krafteinleitung auf der Symmetrieachse liegt. Infolge der Plattenbauweise ermöglichen sie zwischen den Rahmenplatten einen seitlichen Zugriff in den Pressenraum.

Finden der Wirkprinzipien für die Teilfunktion „Kraft messen (M)“

Da vielfältige Arten der Kraftmessung existieren, sollen mit der Delphi-Methode geeignete Wirkprinzipien gesammelt und ausgewählt werden. Im Folgenden wird am Beispiel der Teilfunktion „Kraft messen (M)“ gezeigt, wie die Delphi-Methode bei der Suche nach Einzellösungen eingesetzt werden kann. Die Diskussion mit verschiedenen Fachleuten diente dazu, mögliche neue Zusammenhänge in der Anwendung der Kraftmessung bei Servospindelpressen aufzuzeigen. Der Kreis der befragten Personen bestand vorwiegend aus Entwicklern, Fertigern und weiteren Personen des Kraftaufnehmerbaus. Untypisch für die Delphi-Methode war, dass auch Entwickler aus umformfremden Disziplinen, in diesem Fall aus dem Zerspanungsmaschinenbau, teilnahmen. Deren Teilnahme wurde dadurch gerechtfertigt, dass in einigen spanenden Werkzeugmaschinen Komponenten zur Schnittkraftmessung für die Prozess- und Werkzeugüberwachung eingesetzt werden [134 S. 314]. Die Einbeziehung von Fachleuten aus unterschiedlichen Disziplinen sollte die Lösungsvielfalt erhöhen und helfen, feste Denkweisen zu durchbrechen. Eine anonymisierte Befragung sollte die Bereitschaft zur Teilnahme steigern und Hemmungen vor ungewöhnlichen Antworten abbauen. Die Teilnehmer durften Fragen unbeantwortet lassen. Um ergebnisoffen zu arbeiten, wurde dem Moderator die Möglichkeit gegeben, Fragen neu zu stellen, umzuformulieren oder auszulassen. In mehreren Fragerunden wurden die Teilnehmer nach ihren Einfällen zu einer Problematik befragt. Anschließend wurden alle Ergebnisse anonymisiert den Teilnehmern mitgeteilt und Detaillierungen bzw. Bewertungen gefordert. Mehrfachnennungen wurden im Ausdruck vereinheitlicht und gegebenenfalls gestrichen. Abbildung 4.14 zeigt Ausschnitte aus der Befragung.

Welche physikalischen Prinzipien können beim Bau von Kraftsensoren genutzt werden?

- Abhängigkeit des Widerstandes stromdurchflossener Leiter von ihrem Querschnitt (Dehnungsmessstreifen DMS)
- Nutzen der Kraft-Weg-Analogie / Wegmessung an Federkörpern
- Piezoelektrischer-Effekt (PVDF-Folien oder Lacke)
- Piezoresistiver Effekt
- Induktive Kraftsensoren
- Verformung von Lichtleitern
- Magnetoelastischer Effekt

Welche dieser Prinzipien halten Sie für den Einsatz in Servospindelpressen für geeignet?

- DMS
- Piezoresistive Sensoren

Welche Ausführungen von DMS kennen Sie?

- Folien-DMS
- Halbleiter-DMS

Welche Ausführung halten Sie für den Einsatz in Servospindelpressen für geeignet?

- Folien-DMS

Wie kann die Verformungszone eines DMS-Kraftsensors gestaltet werden?

- Stauchkörper
- Membran
- Biegebalken

An welcher Stelle kann die Kraft gemessen werden?

Benennung der Komponenten nach Abbildung 2.11 in Kapitel 2.1.8

Intern:

- Pressenstößel – Spindelmutter
- Spindel – Spindellager
- Spindellager – Außenprofil
- Außenprofil – Pressengestell (Flansch-Kraftsensor)

Extern:

- Pressenstößel – Werkzeug

Welche Kraftsensoren halten Sie für besonders geeignet?

- Interne DMS-Lagerkörper-Kraftsensoren
- Externe DMS-Membran-Kraftsensoren zwischen Stößel und Werkzeug
- Interne DMS-Flansch-Kraftsensoren

Abbildung 4.14: Delphi-Befragung zur Teilfunktion „Kraft messen (M)“

Das Ergebnis der Delphi-Befragung war die Bevorzugung von DMS-Kraftsensoren. Sie werden entweder in die Spindellageraufnahme integriert, als Messflansch an der Schnittstelle zwischen Presse und Pressengestell angebaut oder als zusätzliches Bauteil zwischen Pressenstößel und Werkzeug angebracht. In einer nachträglichen Diskussion wurde hinterfragt, ob das Ergebnis der Delphi-Befragung schon zu Beginn antizipiert werden konnte. Für die fachfremden Teilnehmer war der Ausgang der Studie offen, da ihnen in einigen Punkten Detailwissen fehlte. So waren ihnen beispielsweise die besonders dehnungsempfindlichen Halbleiter-DMS bekannt, jedoch wussten sie nicht, dass diese sehr temperaturempfindlich und nur aufwendig applizierbar und damit nachteilig sind. Die Kraftaufnehmer-Konstrukteure bejahten die Frage nach der Vorhersehbarkeit der Ergebnisse teilweise, da sie hauptsächlich die genannten Aufnehmertypen bauen. Indem die Fragestellung von Personen mit unterschiedlichem Wissen, Erfahrungen, Ansichten und Blickwinkeln erörtert wurde, stieg die Vielseitigkeit der Problembetrachtung und der gefundenen Lösungen.

Finden der Wirkprinzipien für die Teilfunktion „Aufbau bewegen (S)“

Durch Ausfüllen eines Morphologischen Kastens – Abbildung 4.15 – werden Wirkprinzipien für die Teilfunktion „Aufbau bewegen (S)“ gefunden. Zu diesem Zweck wird die Teilfunktion noch einmal in weitere Teilfunktionen gegliedert. Anschließend werden für diese Teilfunktionen Wirkprinzipien, beginnend bei der Antriebsenergie, gesucht. Offensichtlich ungeeignete Wirkprinzipien werden nicht aufgeführt. Darauf folgend werden Wirkprinzipien zur Energiewandlung gesucht, um die Antriebsenergie in Bewegungsenergie umzuwandeln. Aus der Bewegungsenergie muss eine geradlinig wirkende Kraft sowohl übertragen als auch getrennt werden können, da die Pressenmodule unabhängig voneinander bewegt werden sollen.

Teilfunktion „Aufbau bewegen (S)“						
Teilfunktion von S		Wirkprinzipien				
		1	2	3	4	5
S ₁	Antriebsenergie	Elektrisch	1 2 Pneumatisch	Hydraulisch	Handkraft	
S ₂	Energiewandlung	Elektromagnetisch	1 2 Induktiv	Strahlkraft		
S ₃	Kraftübertragung	Zahnstangengetriebe	Zugmitteltrieb	Gewindespindel	Seilzug/Kettenzug	Reibrad/Reibstange
S ₄	Kraftübertragung trennen	Unterbrechen der Antriebsenergie	Unterbrechen der Energiewandlung	Unterbrechen der Energieumformung	2 Unterbrechen des Kraftflusses	

Abbildung 4.15: Morphologischer Kasten für die Teilfunktion „Aufbau bewegen (S)“

Um die 240 rechnerisch möglichen Kombinationen zu reduzieren, werden durch Untersuchung der Verträglichkeiten der Einzellösungen und einer Vorbewertung ungeeignete Kombinationen ausgeschlossen. Es ergeben sich zwei aussichtsreiche Kombinationen, welche in Abbildung 4.15 als Pfade dargestellt sind.

Der erste Lösungspfad $S_{1-1}-S_{2-1}-S_{3-1}-S_{4-1}$ beschreibt einen elektromagnetischen Antrieb, der ein Zahnstangengetriebe antreibt. Mittels Unterbrechen der elektrischen Antriebsenergie wird die Kraftübertragung getrennt. Aus diesen Wirkprinzipien kann folgende Lösung abgeleitet werden: Ein Elektromotor treibt ein Ritzel auf einer Zahnstange an. Über das Ein- und Ausschalten des Motorstromes kann der Antrieb gesteuert werden. Verschiedene Zahnstangensysteme – denkbar ist u. a. ein spielfreies Zahnstangengetriebe mit vorgespanntem, geteiltem Zahnrad oder eine spielfrei vorgespannte Triebstockverzahnung – können beispielsweise durch Recherchen zu Zahnradbahnen gefunden werden. Die aus dem ersten Lösungspfad abgeleitete Variante erfordert einen eigenen Zahnradantrieb in jedem Pressenmodul, der in eine für alle Pressenmodule gemeinsame Zahnstange eingreift.

Ein zweiter Lösungspfad $S_{1-1}-S_{2-1}-S_{3-3}-S_{4-4}$ besteht ebenfalls aus den Wirkprinzipien „elektrische Antriebsenergie“ und „elektromagnetische Energiewandlung“. Allerdings wird das Wirkprinzip für die Teilfunktion „Kraftübertragung“ durch eine Gewindespindel ausgefüllt und die Kraftübertragung durch Unterbrechen des Kraftflusses getrennt. Aus diesen Wirkprinzipien lässt sich folgende Lösung ableiten: Ein Elektromotor treibt einen Spindeltrieb an. Wird in der Spindelmutter der Formschluss zur Spindel und dadurch die Kraftübertragung unterbrochen, so stoppt auch die Bewegung des Aufbaus. Die Spindelmutter ist also als trennbare Kupplung gestaltet. Diese Variante hat den Vorteil, dass nicht in jedem Pressenmodul ein eigener Antrieb benötigt wird, sondern die Bewegung eines gemeinsamen Antriebes gesteuert abgegriffen werden kann. Zahlreiche weitere Varianten aus Pneumatik- oder Hydraulikzylindern oder durch manuellen Antrieb können gebildet werden, diese sind aber offensichtlich ungeeignet, da sie nicht effizient realisierbar sind oder der Anforderungsliste widersprechen.

4.3.4 Auswählen und Bewerten der Wirkprinzipien

Abbildung 4.16 sammelt in Form eines Morphologischen Kastens die Wirkprinzipien, welche die Teilfunktionen des Pressensystems erfüllen. Diese Darstellungsart ist sehr gut geeignet, die Möglichkeiten des Austausches und der Kombinationen von Wirkprinzipien aufzuzeigen.

	TS	Teilfunktion	Wirkprinzip			
			1	2	3	4
Pressensystem	Pressenmodul	A Halbzeug speichern	Bandhaspel	Platinenstapel		
		B Halbzeug leiten	Bandvorschub und Streifenheber	Transfersystem	Roboter	Handeinlegen
		C Abfall leiten	Rutsche	Band	Roboter	
		D Fertigteil leiten	Rutsche	Band	Roboter	
		E Halbzeug bearbeiten	Werkzeug			
		F Werkzeug festhalten	Elektrische Schwenkspanner	Hydraulische Spanner	Manuelle Spanner	Verschrauben
		G Werkzeug leiten	Werkzeuge einzeln einlegen	Schieneneinschub in Teiledurchlauf-richtung	Schieneneinschub quer zur Teiledurchlauf-richtung	
		H Querkräfte aufnehmen	Säulenführung	Profilführung	Rollenschienenführung	
		I Bearbeitungsenergie bereitstellen	Servospindel-antrieb			
		J Bearbeitungsenergie aufnehmen	C-Gestell	Quasi-O-Gestell mit Zugstreben	Quasi-O-Gestell mit Zuganker	O-Gestell in Plattenbauweise
		K Bauteile anbringen	Umhausung	Pressengestell		
		L Abgrenzen	Gitter	Lichtschranken	Umhausung (Blechschweiß-konstruktion)	Profil-Systembau-kasten
		M Kraft messen	Interner DMS-Kraftsensor	DMS-Flansch-Kraftsensor	Externer DMS-Kraftsensor	
		N Steuerbefehle erfassen	Panel-PC	Bedienkonsole		
		O Werte anzeigen	Panel-PC	Display		
		P Steuern und Regeln	Schaltschrank	Montageplatte		
	Pressenmodul-Positionierung	Q Gewichtskraft aufnehmen	Block	C-Bauweise	2-Stützen-Gestell	
		R Bauteile anbringen	Umhausung	Untergestell		
		S Aufbau bewegen	Zahnstangen-antrieb	Kuppelbarer Positionierantrieb		
		T Bewegungsenergie bereitstellen	Servomotor			
		U Steuern und Regeln	Schaltschrank	Montageplatte		

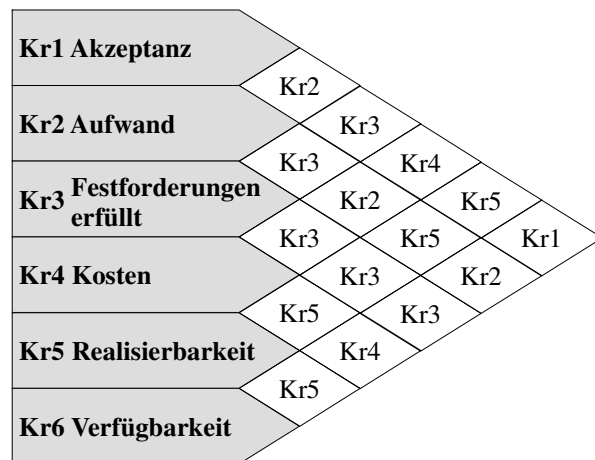
TS... Teilsystem

Abbildung 4.16: Morphologischer Kasten zur Zusammenstellung der Wirkprinzipien

Anschließend werden die weiter zu verfolgenden Wirkprinzipien aus Abbildung 4.16 ausgewählt. Zu diesem Zweck wird eine Vorauswahl mithilfe einer Auswahlliste getroffen. Einfache Entscheidungsaufgaben, wie die Auswahl von Wirkprinzipien, die durch bekannte Maschinenelemente erfüllt werden, lassen sich durch diese Vorauswahl lösen. Für komplexe Entscheidungsaufgaben wird am Anschluss an die Vorauswahl die technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225-3 [111] genutzt.

Abbildung 4.17 zeigt einen Ausschnitt der Auswahlliste für die Wirkprinzipien der Teilfunktionen „Bearbeitungsenergie aufnehmen (J)“, „Kraft messen (M)“ und „Aufbau bewegen (S)“. Dabei sind die Auswahlkriterien nach ihrer Gewichtung geordnet, d. h. vorn stehende Kriterien sind wichtiger als die hinteren. Die Bewertungskriterien können in ihrer Wichtung intuitiv, aber auch durch Hilfsmittel wie Präferenzmatrizen oder Rangfolgeverfahren geordnet werden. In einer Präferenzmatrix werden alle Bewertungskriterien miteinander paarweise verglichen, um diese nach der Anzahl der gewonnenen Direktvergleiche zu ordnen. Rangfolgeverfahren wichten Kriterien ebenfalls durch Direktvergleiche, allerdings lassen sie im Gegensatz zur Präferenzmatrix Gleichstände zu [95 S. 395]. Abbildung 4.18 zeigt die Wichtung der Kriterien der Auswahlliste durch eine Präferenzmatrix und das Rangfolgeverfahren.

a) Präferenzmatrix



	Kr1	Kr2	Kr3	Kr4	Kr5	Kr6
Anzahl	1	3	5	2	4	0
Rang	5	3	1	4	2	6

Kr... Kriterium

b) Rangfolgeverfahren

+ Spalte vorrangig - Spalte nachrangig 0 Spalte gleichrangig	Kr1	Kr2	Kr3	Kr4	Kr5	Kr6	Anzahl „+“
Kr1		+	+	0	+	-	1
Kr2	-		+	-	+	-	3
Kr3	-	-		-	-	-	5
Kr4	0	+	+		+	-	1
Kr5	-	-	+	-		-	4
Kr6	+	+	+	+	+		0
Anzahl „+“	1	3	5	1	4	0	
Rang	4	3	1	4	2	5	

Abbildung 4.18: Möglichkeiten zur Gewichtung von Kriterien

Die Präferenzmatrix und das Rangfolgeverfahren lassen sich in den beiden abgebildeten Darstellungsweisen ausführen, die rechte Darstellung beinhaltet redundante Bewertungen, welche eine einfache Probe möglich machen. Die Anzahl der „+“ jeder Spalte muss gleich der Anzahl der „-“ der entsprechenden Zeile sein. Das Rangfolgeverfahren liefert gleichwertige Ränge, da zwischen den Kriterien „Akzeptanz“ und „Kosten“ eine neutrale Entscheidung getroffen wurde. Um eine eindeutige Wichtung der Kriterien zu erhalten, beruht die Reihenfolge der Kriterien in der Auswahl in Abbildung 4.17 auf der Präferenzmatrix.

Die Erfüllung der Anforderungsliste und die Realisierbarkeit sind dabei ausschließende Kriterien. Wirkprinzipien, die diese Merkmale nicht erfüllen, sind ungeeignet für eine Umsetzung im Pressensystem. Der Aufwand bewertet die geschätzten zusätzlichen Ressourcen, die durch eine Nutzung des Wirkprinzips aufgebraucht werden. So ist in einem bislang rein elektromechanischen System der zusätzliche Aufwand zur Integration hydraulischer Teilsysteme höher als bei der Verwendung eines weiteren elektromechanischen Teilsystems. Außerdem ist der Entwicklungsaufwand bei neuartigen Teilsystemen höher als bei etablierten. Hier gilt der Grundsatz, geeignete Norm- und Kaufteile aufwendigen Neuentwicklungen vorzuziehen. Die erwartbaren Einzelkosten durch Fertigung bzw. Beschaffung werden von dem Merkmal Kosten abgebildet.

In der tendenziell konservativen Welt der Umformtechnik ist die Akzeptanz des technischen Systems ein wichtiger Faktor. Ein Paradigmenwechsel zu neuartigen Systemen kann ein schwieriger und langandauernder Prozess sein. Grundsätzlich muss beim Entwickeln und Konstruieren auch immer die Verfügbarkeit bewertet werden, allerdings sind hier kurzfristige Änderungen möglich. So können Werkstoffe, Halbzeuge und Kaufteile kurzzeitig aus dem Lieferprogramm gestrichen werden oder wieder lieferbar sein. Sollte dieser Fall eintreten, müssen gegebenenfalls bereits abgearbeitete Konstruktionsschritte wiederholt werden.

Die Bewertung in der Auswahlliste kann durch Punkte- oder Notenvergabe, aber auch durch eine Gut-/Schlecht-/Neutral-Bewertung durchgeführt werden. Diese Art der Bewertung vereinfacht die Auswahl und wird daher für das Pressensystem genutzt. Wenn aufgrund fehlender Informationen keine Abschätzung der Eignung möglich ist, so wird dies gekennzeichnet, um nachgeholt zu werden.

Abbildung 4.19 zeigt das Ergebnis der Vorauswahl mit der Auswahlliste. Wirkprinzipien, die in den ausschließenden Kriterien Festforderungen erfüllt und Realisierbarkeit keine positiven Entscheidungen erhalten, werden als grundsätzlich ungeeignet gekennzeichnet und nicht weiter verfolgt. Grundsätzlich geeignete Lösungen werden mithilfe der Auswahlliste bewertet und ausgewählt, sofern es einfache Entscheidungsaufgaben sind. Dazu zählt beispielsweise die Auswahl einfacher Maschinenkomponenten wie die Entscheidung zwischen den Wirkprinzipien Panel-PC und Bedienkonsole für die Teilfunktion „Steuerbefehle erfassen (N)“. Die Entscheidung wird zugunsten des Panel-PCs getroffen, da diese Lösung hinsichtlich des Kriteriums Kosten positiv bewertet wird. Das Wirkprinzip Panel-PC erfüllt neben der Teilfunktion „Steuerbefehle erfassen (N)“ zusätzlich die Teilfunktion „Werte anzeigen (O)“. Gegensätzlich dazu verursacht eine Bedienkonsole höhere Kosten, da sie keine weiteren Teilfunktionen erfüllt. Da das Wirkprinzip Bedienkonsole bezüglich der ausschließenden Kriterien Festforderungen erfüllt und Realisierbarkeit positiv bewertet wird, ist bei der weiteren Entwicklung zu prüfen, ob diese Lösung als zusätzliche Komponente entwickelt und angeboten wird. Denkbar ist beispielsweise, bei der Baukastenentwicklung einen Zubehör-Baustein „Bedienkonsole“ anzubieten.

	Teilsystem Pressenmodul																Teilsystem Pressenmodul- Positionierung																																																																			
Teilfunktion																																																																																				
Wirkprinzip	Halbzeug speichern				Halbzeug leiten				Abfall leiten				Fertigteil leiten				Halbzeug bearbeiten				Werkzeug festhalten				Werkzeug leiten				Querkräfte aufnehmen				Bearbeitungsenergie bereitstellen				Bearbeitungsenergie aufnehmen				Bauteile anbringen				Abgrenzen				Kraft messen				Steuerbefehle erfassen				Werte anzeigen				Steuern und Regeln				Gewichtskraft aufnehmen				Bauteile anbringen				Aufbau bewegen				Bewegungsenergie bereitstellen				Steuern und Regeln			
	<u>A1</u> A2				<u>B1</u> B2 B3 B4				<u>C1</u> C2 C3				<u>D1</u> D2 D3				<u>E1</u>				<u>F1</u> F2 F3 F4				G1 <u>G2</u> G3				H1 H2 <u>H3</u>				<u>I1</u>				J1 J2 J3 J4				<u>K1</u> <u>K2</u>				L1 L2 <u>L3</u> L4				M1 M2 M3				<u>N1</u> N2				<u>O1</u> O2				<u>P1</u> P2				Q1 Q2 Q3				<u>R1</u> <u>R2</u>				S1 S2				<u>T1</u>				<u>U1</u> U2			

~~durchgestrichen~~

Grundsätzlich ungeeignet

fett + unterstrichen

Einfache Entscheidungsaufgabe, daher keine weitere Bewertung notwendig, Auswahl durch Auswahlliste

grau hinterlegt

Komplexe Entscheidungsaufgabe, daher weitere Bewertung notwendig, Auswahl durch technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225-3

Abbildung 4.19: Ergebnis der Vorauswahl der Wirkprinzipien aus Abbildung 4.16 durch die Auswahlliste aus Abbildung 4.17

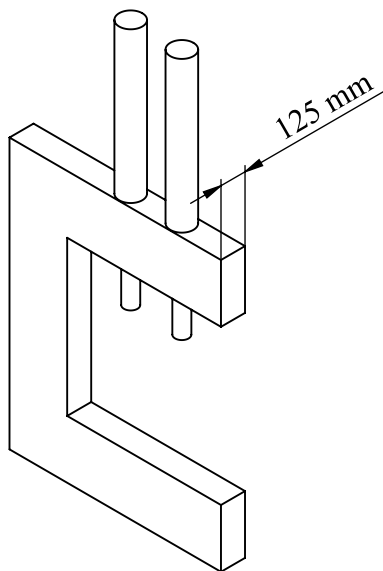
Für komplexe Entscheidungsaufgaben wird zusätzlich zur Auswahlliste die technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225-3 [111] genutzt. Sie bietet wie die in Kapitel 2.2.5 beschriebene Nutzwertanalyse eine Gewichtung der Kriterien, da diese nicht hierarchisch strukturiert werden, entfallen die Nachteile der Nutzwertanalyse. Außerdem werden die technischen von den wirtschaftlichen Kriterien getrennt, sodass die technischen Aspekte auch unabhängig von ökonomischen Kriterien bewertet werden können. Somit wird offensichtlich, wenn eine gute technische Bewertung durch die Nutzung kostenintensiver Lösungen erreicht wird. Analog dazu werden leistungsschwächere aber preiswerte Low-Cost-Maschinen durch die technisch-wirtschaftliche Bewertung schnell identifiziert. Dabei wird nicht nach einzelnen Gestaltungsrichtlinien bewertet, sondern nach Gesamtkriterien, welche neben den Gestaltungsleitlinien aus Kapitel 2.2.6 auch die wichtigsten Anforderungen aus der Anforderungsliste aus Kapitel 4.2 beinhalten. Da die Erfüllung der Festforderungen bereits eine Voraussetzung für das Bestehen der Vorauswahl durch die Auswahlliste ist, fließen nur noch Wunschforderungen in die Bewertung ein.

Technisch-wirtschaftliches Bewerten der Wirkprinzipien für die Teilfunktion „Bearbeitungsenergie aufnehmen (J)“

Im Folgenden wird die Bewertung der Wirkprinzipien für die Teilfunktion „Bearbeitungsenergie aufnehmen (J)“ durch geeignete Pressengestelle erörtert. Die in Abbildung 4.13 in Kapitel 4.3.3 gezeigten Gestelle sind nach einer Vorauswahl durch die Auswahlliste nach Abbildung 4.17 grundsätzlich für eine Verwendung im Pressensystem geeignet. Eine detaillierte Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften soll das weiter zu entwickelnde Wirkprinzip festlegen.

Um die vier Pressengestelle miteinander vergleichen zu können, müssen sie auf eine Bezugsgröße normiert werden. Dafür bieten sich u. a. die Dicke der Gestellplatten oder die Gesamtmasse des Gestells an. In diesem Fall ist die Normierungsgröße der seitliche Zugang in den Pressenraum, der bei allen vier Gestellen 125 mm beträgt, wie Abbildung 4.20 zeigt. Die Festlegung auf diesen Zahlenwert geschieht vor dem Hintergrund, dass der für die Befestigung der Pressenantriebe notwendige Bauraum frei gehalten wird.

a) C-Gestell



b) O-Gestell in Plattenbauweise

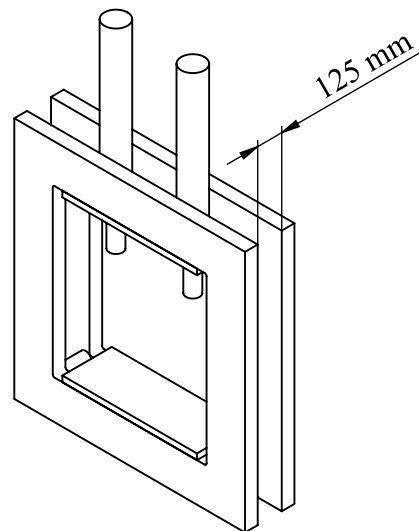


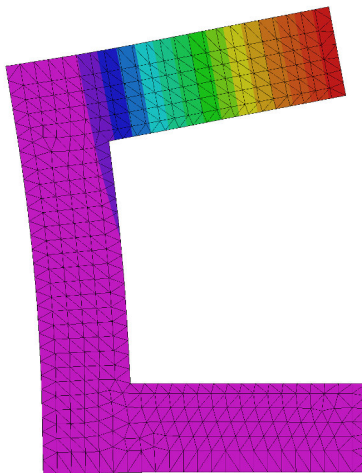
Abbildung 4.20: Seitlicher Zugang zum Pressenraum beim C-Gestell und beim O-Gestell

Die Pressenantriebe werden bei dem C-Gestell und den beiden Quasi-O-Gestellen auf dem oberen Gurt angebaut, beim O-Gestell werden sie zwischen den Rahmenplatten montiert. Der Bau-raum der Pressenantriebe beträgt in Teiledurchlaufrichtung 125 mm, daher beträgt die Plattendicke des C-Gestells und der beiden Quasi-O-Gestelle ebenfalls 125 mm, während der Abstand zwischen beiden Rahmenplatten des O-Gestells 125 mm groß ist. Die Dicke der Rahmenplatten des O-Gestells beträgt jeweils 40 mm, da Platten bis zu dieser Dicke noch als Laserstrahlzuschnitte gefertigt werden können. Diese erfordern keine Nachbearbeitung der Schnittflächen und sind daher kostengünstig verfügbar. Gleichzeitig ist die Dicke der Rahmenplatten von 40 mm ein Kompromiss zwischen Aufbiegung und Stichmaß. Der Pressenraum des C-Gestells und der beiden Quasi-O-Gestelle ist gleich groß, er beträgt 800 x 800 x 125 mm, während der Pressenraum des O-Gestells 800 x 800 x 205 mm beträgt.

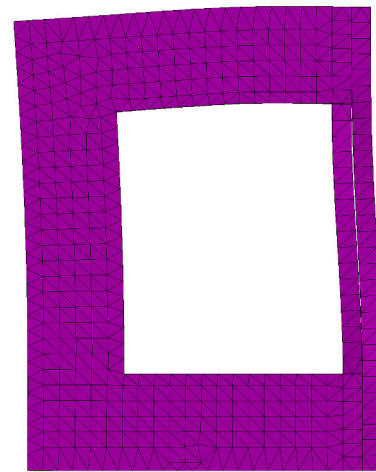
Die Normierung auf den seitlichen Zugang zum Pressenraum macht es notwendig, neben der Aufbiegung auch die Masse der Gestelle bei der Bewertung der technischen Merkmale zu berücksichtigen. Dabei beeinflussen sich beide Größen wechselseitig, mit steigender Plattendicke sinkt die Aufbiegung der Gestelle. Außerdem muss das Stichmaß – der kleinstmögliche Abstand zweier aufeinanderfolgender Pressenmodule – bewertet werden, da das O-Gestell in der Tiefe um die doppelte Dicke der Rahmenplatten verlängert ist. Dadurch ist auch das mögliche Stichmaß des O-Gestells um die zweifache Dicke der Rahmenplatten größer als bei den drei anderen Gestellen, statt 125 mm beträgt es 205 mm.

Die Masse der Gestelle wird mithilfe der CAD-Software bestimmt, die geometrischen Veränderungen des Gestells unter der Einwirkung der Stößelkraft wird durch FE-Simulationen ermittelt. Abbildung 4.21 zeigt die Berechnungsparameter und -konventionen der FE-Berechnung. Es wird eine im nach unten freistehenden Bereich des oberen Gurtes mittig angreifende Kraft F von 30 kN und ein Stahl mit einem E-Modul von 210 000 MPa angenommen. Der Betrag der Aufbiegung wird durch die Kenngröße u_2 , welche die Verschiebung des Kraftangriffspunktes P_2 in Richtung der Kraft F misst, ausgedrückt. Zur Ermittlung des Winkels α wird die Differenz Δu_{3-1} der Verschiebungen u_3 und u_1 der dazugehörigen Punkte P_1 und P_3 , die beidseitig im Abstand $a=250$ mm zum Kraftangriffspunkt P_2 liegen, berechnet. Unter der Annahme eines rechtwinkligen Dreiecks und der nur in Kraftrichtung verschobenen Punkte P_1 und P_3 kann somit der Winkel α nach der in Abbildung 4.21 angegebenen Gleichung berechnet werden. Die Ergebnisse der FE-Berechnungen zeigt Abbildung 4.22.

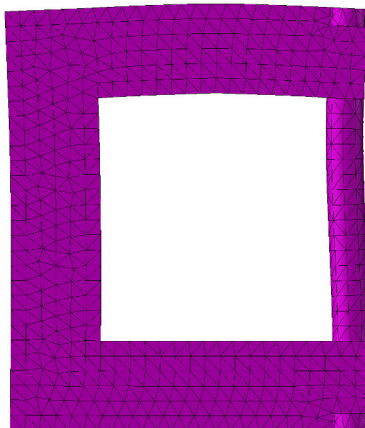
a) Wirkprinzip J1: C-Gestell



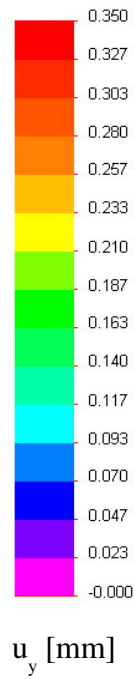
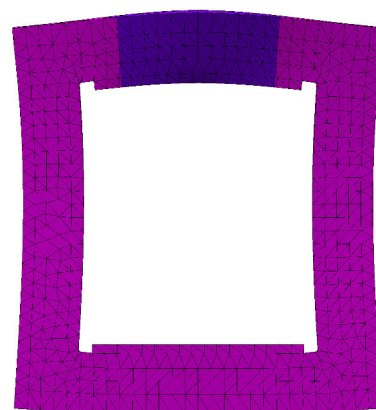
b) Wirkprinzip J2: Quasi-O-Gestell mit Zugstreben



c) Wirkprinzip J3: Quasi-O-Gestell mit entfernbarem Zuganker



d) Wirkprinzip J4: O-Gestell in Plattenbauweise



	Wirkprinzip J1	Wirkprinzip J2	Wirkprinzip J3	Wirkprinzip J4
	C-Gestell	Zugstreben	Zuganker	O-Gestell
Masse [kg]	883	905	998	623
u_1 [mm]	0,103	0,012	0,010	0,026
u_2 [mm]	0,196	0,025	0,018	0,047
u_3 [mm]	0,294	0,020	0,014	0,026
Δu_{1-3} [mm]	0,191	0,008	0,004	0
α [°]	0,0219	0,0009	0,0005	0

Abbildung 4.22: Ergebnisse der Berechnungen der Aufbiegung unter Last

Die Aufbiegung und der Winkelversatz sind beim seitlich offenen C-Gestell besonders groß. Da im Allgemeinen die Kraft beim O-Gestell bei mittig angreifender Last entlang der Symmetrielinie wirkt, biegt sich dieses symmetrisch auf. Der Betrag der Aufbiegung u_2 des O-Gestells ist höher als bei den Quasi-O-Gestellen mit Zugstreben bzw. Zugankern, da bei der Plattenbauweise weniger Material der Verformung Widerstand entgegensetzt. Durch dickere Rahmenplatten kann die Verschiebung u_2 verringert werden. Um beim O-Gestell den Wert der Verschiebung u_2 des Quasi-O-Gestells mit Zuganker von 0,018 mm zu erreichen, sind bei ansonsten gleichbleibenden Abmaßen Rahmenplatten mit einer Wanddicke von 105 mm statt 40 mm notwendig. Bei dieser Dicke der Rahmenplatten ist das Gewicht des O-Gestells mit 1530 kg auf 246 % angewachsen und erreicht damit weitaus höhere Werte als das C-Gestell mit Zuganker. Außerdem müssen im O-Gestell die Trägerplatten zwischen den beiden Rahmenplatten versteift werden, um den Einfluss des Beulens zu minimieren. Da die Aufbiegung von 0,047 mm beim O-Gestell noch zulässig ist, sollen diese Änderungen Varianten vorbehalten bleiben. Die Biegesteifigkeit der dritten Gestellvariante kann durch Verändern der Vorspannung im Zuganker angepasst werden.

Grundsätzlich ist die absolute Aufbiegung u_2 bei allen Gestellvarianten ermittelbar und reproduzierbar, daher kann eine geeignete Software diese kompensieren. Bei kraftgeregeltem Verfahren des Pressenstößels wird der Prozess nicht von der absoluten Aufbiegung beeinflusst. Ein Winkelversatz hingegen ist nur durch zusätzliche Elemente, wie sie z. B. LADWIG [29] beschreibt, ausgleichbar.

Abbildung 4.23 zeigt die technisch-wirtschaftliche Bewertung der vier Wirkprinzipien für die Teilfunktion „Bearbeitungsenergie aufnehmen (J)“. Wie in Kapitel 2.2.5 beschrieben, werden die vier Wirkprinzipien anhand von Bewertungsmerkmalen mit annähernd gleicher Bedeutung bewertet. Durch die Normierung der Punktzahl der quantifizierbaren Merkmale auf die Abweichung von Minimal- zu Maximalwert erhält die beste Merkmalsausprägung immer die höchste Punktzahl, während die schlechteste Ausprägung keine Punkte erhält.

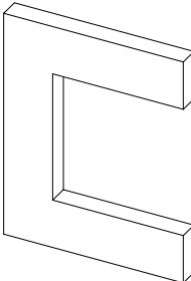
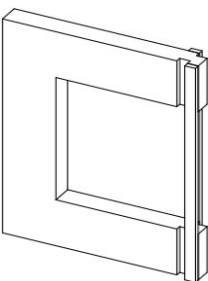
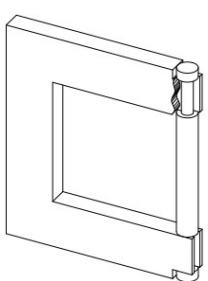
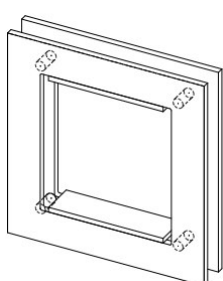
Wirkprinzip				
J1	J2	J3	J4	
				
J1	J2	J3	J4	
Quantifizierbare Merkmale				
Anzahl beweglicher Komponenten [-]	0	0	1	0
Anzahl beweglicher Komponenten [Punktzahl]	4	4	0	4
Betrag der Aufbiegung unter Last u_2 [mm]	0,196	0,025	0,018	0,047
Betrag der Aufbiegung unter Last u_2 [Punktzahl]	0	4	4	4
Realisierbares Stichmaß [mm]	125	125	125	205
Realisierbares Stichmaß [Punktzahl]	4	4	4	0
Winkel der Aufbiegung unter Last α [°]	0,0219	0,0009	0,0005	0,0
Winkel der Aufbiegung unter Last α [Punktzahl]	0	4	4	4
Zu bewegendende Masse [kg]	883	905	998	623
Zu bewegendende Masse [Punktzahl]	1	1	0	4
Nicht einfach quantifizierbare Merkmale				
Geringer Anpassungsaufwand	2	2	1	4
Seitlicher Zugang	4	2	4	2
Verbreitung im Pressenbau	4	0	0	4
Erreichte Punktzahl $\sum p_m$	19	21	17	26
Maximale Punktzahl $m \cdot p_{max}$	32			
Technische Wertigkeit x	0,59	0,66	0,53	0,81
Wirtschaftliche Wertigkeit y	1	0,81	0,69	0,87
Stärke durch arithmetische Mittelwertbildung s_a	0,80	0,73	0,61	0,84
Stärke durch geometrische Mittelwertbildung s_g	0,77	0,73	0,61	0,84

Abbildung 4.23: Technisch-wirtschaftliche Bewertung für die Teilfunktion
„Bearbeitungsenergie aufnehmen (J)“

Nach der VDI 2225-3 [111 S. 4] soll die technische Wertigkeit einer Lösung nicht geringer als 0,6 sein. Die Wirkprinzipien J1 und J3 erfüllen diese Bedingung nicht. Wegen der hohen und wenig parallelen Aufbiegung wird J1, das einfache C-Gestell, im Vergleich zu den anderen Wirkprinzipien in den betreffenden Merkmalen sehr gering bewertet. Das Wirkprinzip J2, welches ein C-Gestell mit zusätzlichen seitlichen Zugstreben zur Verringerung von Betrag und Winkel der Aufbiegung kombiniert, erhält in diesen Merkmalen ebenso wie J3 und J4 die Höchstpunktzahl. Allerdings bauen die Wirkprinzipien J1, J2 und J3 schwerer als das Wirkprinzip J4, das O-Gestell in Plattenbauweise. Des Weiteren ist die besondere Bauart von J2, die seitlichen Zugstreben, im Pressenbau nicht verbreitet, sodass die Funktionsfähigkeit und die Akzeptanz dieses Gestells in der Praxis noch unklar ist. Diesen Nachteil hat auch die das Wirkprinzip J3, das C-Gestell mit entfernbarem Zuganker, welches die niedrigste Punktzahl in der technischen Wertigkeit erlangt. Dieses Gestell erreicht die geringste Aufbiegung unter Last, allerdings erhält es durch die Normierung der Punktzahl auf die Differenz zwischen Minimal- und Maximalwerten in dieser Kategorie die gleiche Punktzahl wie die Wirkprinzipien J2 und J4. Um den seitlichen Zugang zu ermöglichen, muss der Zuganker demontiert werden, als einziges Gestell mit bewegten Komponenten ist es in diesem Vergleich den anderen unterlegen. Durch den zusätzlichen Zuganker baut es am schwersten, das Wirkprinzip J4 wiegt nur etwa das 0,6-fache. Diese Ausführung eines O-Gestells ist durch die mit Distanzrohren und Trägerplatten verbundenen Rahmenplatten einfacher anpassbar. Sollen tiefere Gestelle gebaut werden, müssen nur die Distanzrohre und Trägerplatten verändert werden. Die Aufbiegung unter mittlerer Last ist symmetrisch, durch dickere Rahmenplatten kann der Betrag der Aufbiegung gesenkt werden. Daraus würde allerdings eine Erhöhung von Stichmaß und Masse resultieren. Geringe Punktzahlen erreicht dieses Wirkprinzip in den Merkmalen Stichmaß und seitlicher Zugang. Der seitliche Zugang ist, ebenso wie bei Wirkprinzip J2, zwar gegeben, allerdings ist er durch die Rahmenplatten begrenzt.

Aufgrund der vielen positiv bewerteten Merkmale des O-Gestells erreicht dieses die beste technische Wertigkeit. Da die Bauteile des Pressensystems ausschließlich zugekauft werden, wird der Prozess der Kostenermittlung vereinfacht, indem mehrere Angebote für Fertigungs- und Kaufteile eingeholt und verglichen werden. Wegen der Neuartigkeit des Pressensystems und der daher fehlenden Vergleichbarkeit mit bestehenden Maschinen auf dem Markt werden die idealen Herstellkosten durch die Beschaffungskosten des preiswertesten Gestells beschrieben. Die beste wirtschaftliche Wertigkeit erreicht das Wirkprinzip J1, das C-Gestell. Die Beschaffungskosten dieses Gestells bilden die Bezugsgröße B_{min} nach Gleichung 3 in Kapitel 2.2.5.

Aus der technischen und der wirtschaftlichen Wertigkeit lässt sich die Stärke durch arithmetische Mittelwertbildung nach Gleichung 4 in Kapitel 2.2.5 und durch geometrische Mittelwertbildung nach Gleichung 5 im selben Kapitel bilden. Nur bei dem Wirkprinzip J1 sind die arithmetische und geometrische Stärke verschieden, weil in diesem Fall die technische und die wirtschaftliche Wertigkeit besonders stark voneinander abweichen. Nach Ausschluss der Wirkprinzipien J1 und J3, da beide eine zu geringe technische Wertigkeit unter 0,6 erreichen, bleiben die Wirkprinzipien J2 und J4 übrig. Es wird das stärkste Wirkprinzip, das O-Gestell in Plattenbauweise ausgewählt, um die Teilfunktion „Bearbeitungsenergie aufnehmen (J)“ zu erfüllen.

Die noch fehlenden Wirkprinzipien werden ebenfalls durch das technisch-wirtschaftliche Bewerten ausgewählt. Abbildung 4.24 zeigt die Auswahl aller Wirkprinzipien, die im Morphologischen Kasten in Abbildung 4.16 zusammengestellt sind. Eine Vorauswahl mithilfe von Auswahllisten bei einfachen Entscheidungsaufgaben ist schon in Abbildung 4.19 geschehen. Die Kombination der gefundenen Wirkprinzipien geschieht im folgenden Kapitel.

	Teilsystem Pressenmodul																Teilsystem Pressenmodul- Positionierung																									
Teilfunktion	Halbzeug speichern		Halbzeug leiten		Abfall leiten		Fertigteil leiten		Halbzeug bearbeiten		Werkzeug festhalten		Werkzeug leiten		Querkräfte aufnehmen		Bearbeitungsenergie bereitstellen		Bearbeitungsenergie aufnehmen		Bauteile anbringen		Abgrenzen		Kraft messen		Steuerbefehle erfassen		Werte anzeigen		Steuern und Regeln		Gewichtskraft aufnehmen		Bauteile anbringen		Aufbau bewegen		Bewegungsenergie bereitstellen		Steuern und Regeln	
Wirkprinzip	<u>A1</u> A2	B1 B2 B3 B4	<u>C1</u> C2 C3	D1 D2 D3	<u>E1</u>	F1 F2 F3 F4	G1 <u>G2</u> G3	H1 H2 <u>H3</u>	<u>I1</u>	J1 J2 J3 J4	<u>K1</u> K2	L1 L2 <u>L3</u> L4	<u>M1</u> M2 M3	N1 N2	<u>O1</u> O2	P1 P2	Q1 Q2 Q3	<u>R1</u> R2	S1 <u>S2</u>	<u>T1</u>	<u>U1</u> U2																					

~~durchgestrichen~~

Grundsätzlich ungeeignet

fett + unterstrichen

Einfache Entscheidungsaufgabe, Auswahl durch Auswahlliste

fett + unterstrichen
+ grau hinterlegt

Komplexe Entscheidungsaufgabe, Auswahl durch technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225-3

Abbildung 4.24: Ergebnis der Auswahl der Wirkprinzipien aus Abbildung 4.16 durch die Auswahlliste aus Abbildung 4.17 und das technisch-wirtschaftliche Bewerten

4.3.5 Konzeptionieren des Werkzeugwechselsystems

Im Folgenden soll das Werkzeugwechselsystem des Pressensystems als Vorbereitung der Weiterentwicklung konzeptioniert werden. Wegen des durch die O-Gestell-Platten seitlich begrenzten Zuganges zum Pressenraum kann der Werkzeugwechsel auf drei Arten geschehen, wie Abbildung 4.25 zeigt.

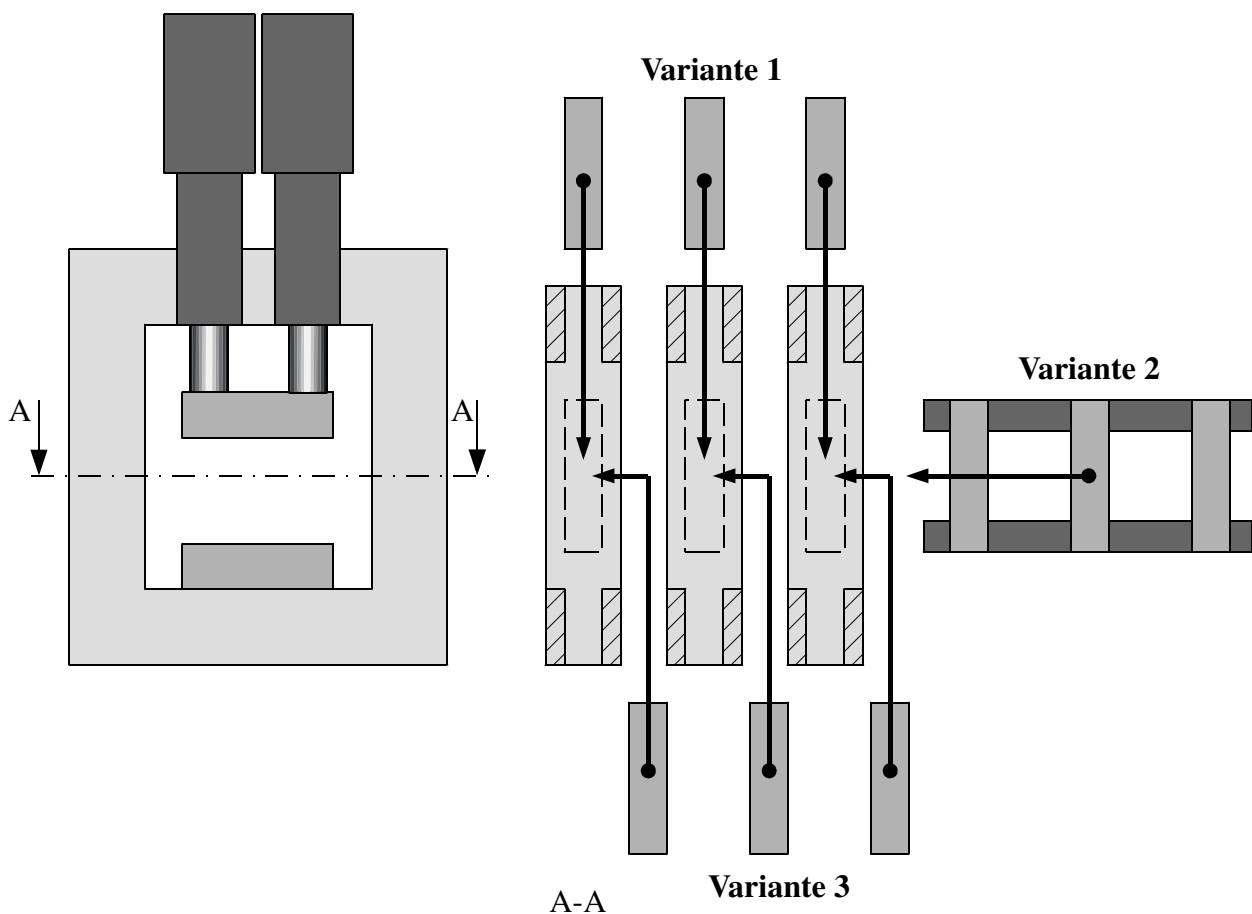


Abbildung 4.25: Möglichkeiten des Werkzeugwechsels

Der Werkzeugwechsel kann nach Variante 1 zwischen den Rahmenplatten des O-Gestells auf gerader Bahn, nach Variante 2 auf einem gemeinsamen Werkzeugträger entgegen der Teiledurchlaufrichtung oder nach Variante 3 zwischen den Pressenmodulen auf einer abgewinkelten Bahn ablaufen. Variante 1 und 3 erfordern ein genaues Ausrichten der Werkzeuge in den Pressenmodulen und der Pressenmodule untereinander, um enge Toleranzen von Position und Lage der Werkzeuge einhalten zu können. Für einen Werkzeugwechsel nach Variante 3 müssen aneinanderliegende Pressenmodule auseinander gefahren werden, außerdem erfordert die abgewinkelte Bewe-

gung einen höheren Aufwand. Variante 1 erlaubt nur Werkzeuge mit einer Tiefe, die kleiner als der lichte Abstand der beiden Rahmenplatten des O-Gestells ist, was der Lösungsidee nach Kapitel 3.2 widerspricht. Denkbar ist eine Kombination aus Variante 1 und 3, bei der nur unpassend tiefe Werkzeuge zwischen auseinander gefahrenen Pressenmodulen gewechselt werden.

Nutzbare Vorteile gegenüber den Varianten 1 und 3 bietet die zweite Variante. Das Vorpositionieren der Werkzeuge auf einer gemeinsamen Schiene entkoppelt den Einfluss der Position und Lage der Gestelle auf die Toleranz der Werkzeugposition und -lage. Die Genauigkeitsanforderungen an die Position und die Parallelität der Pressenmodule werden dadurch entschärft. Hinzu kommt, dass der folgende Werkzeugsatz auf einem neuen Werkzeugträger bei laufender Presse eingerichtet werden kann. Nachteilig ist der erhöhte Aufwand, wenn nur ein Werkzeug aus dem Werkzeugsatz ausgetauscht werden soll und die Erhöhung der Zusatzkomponenten um die notwendigen Werkzeugträger. Als Ergebnis der Argumentenbilanz wird der Werkzeugwechsel nach Variante 2 bevorzugt und für das Pressensystem vorgesehen.

Das Werkzeugwechselsystem erfordert von der Seite wirkende Spannsysteme zum Festhalten der Werkzeuge in Presse und Stößel. Dazu gehören Schwenk- und Hebelspanner, deren Spannelemente von außen über die Spannplatte geführt werden und diese dann mit der Tisch- bzw. Stößelplatte verspannen. Schwenkspanner schwenken das Spannelement auf einer senkrecht zur Spannfläche stehenden Achse über die Spannleiste und spannen durch Druck auf die Spannleiste. Die Spannhöhe ist einstellbar, der Spannhub beträgt wenige Zentimeter. Im Gegensatz zu Hebelspannern sind Schwenkspanner neben einem hydraulischen auch mit elektrischem Antrieb verfügbar, wodurch kein neues Medium erforderlich wird. Das Spannen mit Spannleisten würde ein genaues und damit fehleranfälliges Einfädeln des Werkzeugsatzes erfordern, das Spannen über beispielsweise T-Nuten-Spanner oder Dreh-Zug-Spanner ist daher nicht vorgesehen. Zapfenspannsysteme sind ebenso wenig geeignet, da herausragende Zapfen nicht das Einschieben des Werkzeugsatzes behindern dürfen. Die Pressenmodule müssen passend zum Werkzeugsatz positioniert werden. Werkzeugober- und -unterteil werden bis zum Spannen in der Presse durch Führungen oder Zentrierungen zueinander festgelegt.

Abbildung 4.26 zeigt verschiedene Einbaumöglichkeiten der Werkzeuge. Die Arbeitspunkte der Pressenmodule müssen immer um ein Ein- oder Vielfaches des Stichmaßes s voneinander entfernt liegen. Das Stichmaß gibt den kleinsten Abstand zweier aufeinanderfolgender Module an, es ist das Ein- oder Vielfache des Vorschubes t . Im Allgemeinen werden die Arbeitspunkte mittig in den Modulen liegen. Wird allerdings ein breites Werkzeug von mehreren Modulen angetrieben, so können die Arbeitspunkte außermittig liegen.

Im Beispiel trifft dies auf WKZ 1 und die Pressenmodule 1 und 3 zu. Darauf folgende Pressenmodule mit mittigem Arbeitspunkt müssen in diesem Fall um ein Vielfaches des Stichmaßes entfernt positioniert werden. [135 S. 22f]

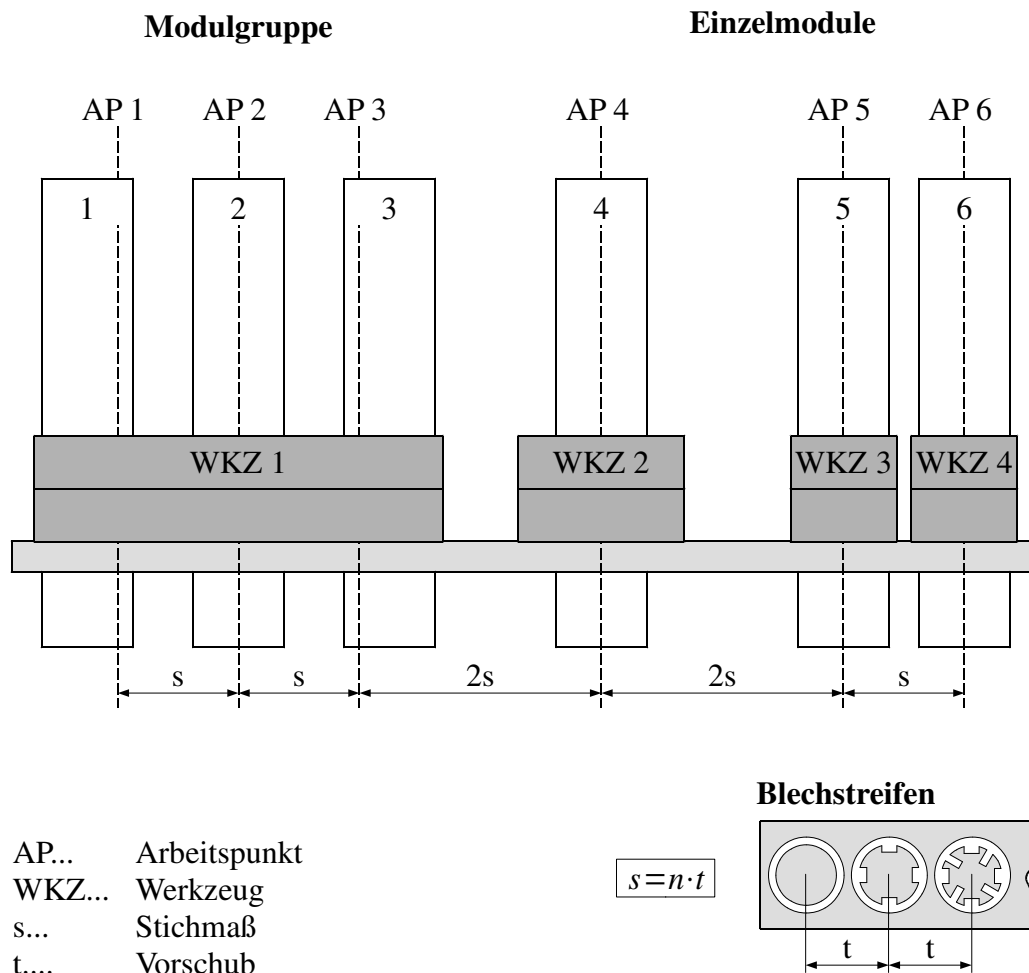
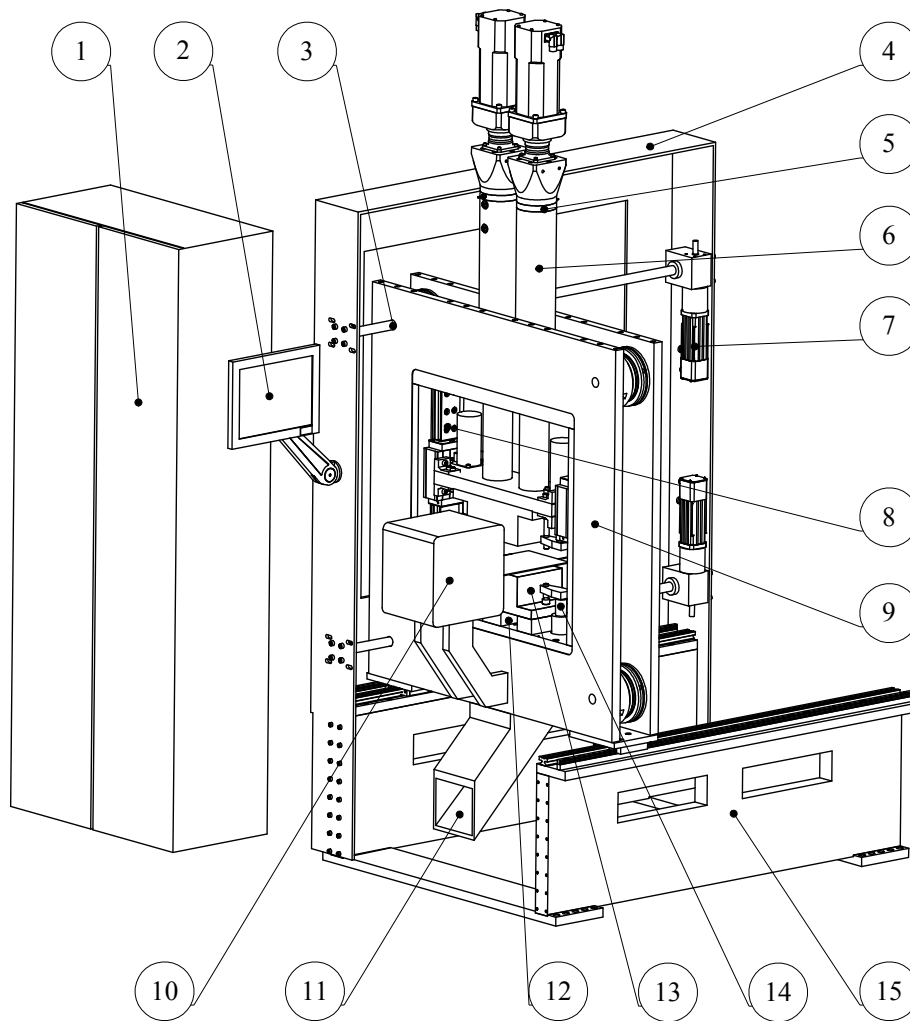


Abbildung 4.26: Werkzeug-Einbaumöglichkeiten nach VIEHWEGER u. a. [136 S. 22]

Das Pressensystem ist nicht an eine Form des Teiletransportes gebunden. Möglich ist der Bandvorschub durch Walzen, wie er in Folgeverbundwerkzeugen genutzt wird, aber auch der Einsatz von seitlich wirkenden Transfersystemen sowie der Teiletransport durch Roboter. Der Teiletransport muss an den langsamsten Hub gekoppelt werden. Die Möglichkeit, den Streifen durch Federn anzuheben, besteht in Einzelwerkzeugsätzen mit unterschiedlichen Stößelbewegungsprofilen nicht. Wird ein Bandvorschubsystem genutzt, bietet sich ein Streifenheber an, der unabhängig vom Werkzeug gesteuert werden kann und so an den langsamsten Hub gekoppelt wird.

4.3.6 Darstellen der Prinzipiellen Lösung als Bauzusammenhang

Im Anschluss an die Auswahl und Bewertung der Wirkprinzipien werden diese miteinander kombiniert und daraus die Prinzipielle Lösung des Pressensystems abgeleitet. Einige der ausgewählten Wirkprinzipien sind bekannte Maschinenkomponenten. Dazu zählen Bandhaspel, Bandvorschub, Rutsche, elektrischer Schwenkspanner, Rollenschienenführung, Servospindelantrieb, interner DMS-Kraftsensor und Panel-PC. Aufgrund der hohen Komplexität des Pressensystems sollen die einzelnen Wirkprinzipien nicht in einer Strukturdarstellung auf ihre zahlreichen physikalischen, geometrischen und stofflichen Merkmale aufgeschlüsselt werden. Auf die Abbildung einer hochgradig komplexen Wirkstruktur wird verzichtet. Um die Kombination der Wirkprinzipien aufzuzeigen, wird der Bauzusammenhang des Systems [95 S. 251] dargestellt. In Abbildung 4.27 wird die bauliche Ordnung der Komponenten illustriert. Zur besseren Darstellung ist der vordere Teil der Umhausung und Teile des kuppelbaren Positionierantriebes ausgeblendet. Der Bauzusammenhang zeigt, dass die Umhausung zum Erfüllen der Teilfunktion „Abgrenzen (L)“ nicht mehr innerhalb des Teilsystems Pressenmodul angeordnet ist, sondern auf die Pressenmodul-Positionierung übergegangen ist.



Nr.	Benennung	Teilfunktion	Nr.	Benennung	Teilfunktion
1	Schaltschrank	[P]: Steuern und Regeln [U]: Steuern und Regeln	9	O-Gestell in Plattenbauweise	[J]: Bearbeitungsenergie aufnehmen [K]: Bauteile anbringen
2	Panel-PC	[N]: Steuerbefehle erfassen [O]: Werte anzeigen	10	Bandhaspel mit Vorschub	[A]: Halbzeug speichern [B]: Halbzeug leiten
3	Kuppelbarer Positionierantrieb	[S]: Aufbau bewegen	11	Rutsche	[C]: Abfall leiten [D]: Fertigteil leiten
4	Umhausung	[K]: Bauteile anbringen [L]: Abgrenzen	12	Schieneneinschub	[G]: Werkzeug leiten
5	Interner DMS-Kraftsensor	[M]: Kraft messen	13	Werkzeug	[E]: Halbzeug bearbeiten
6	Servospindel-antrieb	[I]: Bearbeitungsenergie bereitstellen	14	El. Schwenkspanner	[F]: Werkzeug festhalten
7	Servomotor	[T]: Bewegungsenergie bereitstellen	15	2-Stützen-Gestell	[Q]: Gewichtskraft aufnehmen [R]: Bauteile anbringen
8	Rollenschienenführung	[H]: Querkräfte aufnehmen			

Abbildung 4.27: Darstellung des Bauzusammenhanges

4.4 Ableiten des Entwurfes

Nach der Auswahl eines technisch und wirtschaftlich sinnvollen Konzeptes wird in der Entwurfsphase die Prinzipielle Lösung ausgestaltet. Ein weiteres Ziel dieser Phase ist es, das Zusammenwirken der Komponenten und Module in einer Produktarchitektur zu strukturieren. Das methodische Entwerfen ist in der VDI 2223 [137] genormt und wird in der Literatur [89] [90] [91] [92] [93] [94] [95] beschrieben. Der Ablauf beim Entwerfen ist wegen der hohen Komplexität nicht streng festgelegt, sondern wird an die Gegebenheiten angepasst [95 S. 465]. Von Projekt zu Projekt ist der genaue Ablauf und Inhalt verschieden, allerdings sollten bestimmte Hauptschritte in jeder Entwicklungsarbeit durchgeführt werden. Dies sind die Schritte 4 bis 6 der Abbildung 4.1 in Kapitel 4.1, aus denen modulare Strukturen, Vorentwürfe und schließlich ein Gesamtentwurf resultieren.

4.4.1 Gliedern in realisierbare Module

Zur Einleitung der Entwurfsphase werden die gestaltungsbedingenden Anforderungen gesammelt. Diese stammen aus der Anforderungsliste, aus neuen Bedingungen, die durch Abhängigkeiten innerhalb der Wirkprinzipien entstanden sind und aus weiteren Faktoren, die nicht aus der Anforderungsliste oder den Wirkprinzipien ableitbar sind. Beispiele zu letzterem sind Vorschriften und Produktionsbedingungen. FELDHUSEN & GROTE [95 S. 464] zählen verschiedene Einflussfaktoren auf und kategorisieren diese in Einflusscluster. Die wichtigsten Gestaltungseinflüsse des Pressensystems sind in Abbildung 4.28 zusammengetragen.

Im Anschluss an die Zusammenstellung der für das Gestalten bedeutenden Bedingungen wird das Konzept für eine weitere Bearbeitung geordnet, sodass eine modulare Struktur gebildet werden kann. Zu diesem Zweck wird die in der Konzeptphase gefundene Prinzipielle Lösung in Komponenten aufgegliedert und diese Komponenten werden anschließend Modulen zugewiesen, sodass eine Produktstruktur⁹ entsteht. Die Modularisierung der Produktstruktur wird gesondert in Kapitel 5.3 beschrieben, da sie die Grundlage für weitere Maßnahmen wie die Typengruppen- und Baukastenentwicklung bildet.

⁹ Produktstrukturen werden in der Literatur auch als Baustruktur, Erzeugnisstammbaum oder Erzeugnisgliederung bezeichnet [95 S. 255]. In Kapitel 2.2.7 wird der Begriff näher erläutert.

Einflusscluster	Beispiele
Gesetze und Normen	<ul style="list-style-type: none"> • Maschinenrichtlinie 2006/42/EG nach Artikel 12 inkl. EG-Baumusterprüfung • Produktsicherheitsgesetz, Betriebssicherheitsverordnung, Arbeitsschutzgesetz • DIN EN 692, EN 294, EN 349, EN 418, EN 574, EN 626, EN 842, EN 953, EN 954, EN 999, EN 1005-2, EN 1037, EN 1088, EN 1299, EN 60204-1, EN 61496-1, EIN ISO 12100
Produktionsbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit leistungsstarker Servomotoren
Aus eigenem Unternehmen	<ul style="list-style-type: none"> • Kompatibilität mit vorhandener Software • Nutzung vorhandener Messverstärker
Einsatzbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Dauerbetrieb • Ausfallvermeidung bei Fehlnutzung
Zweck des Produktes	<ul style="list-style-type: none"> • Blechbauteile herstellen • Pressenmodule synchronisieren • Pressenmodule positionieren • Integration von Sensorik
Eigenstörungen des Produktes	<ul style="list-style-type: none"> • Überhöhte Belastungen • Schwingungserregung • Wärme

Abbildung 4.28: Einflussfaktoren der Gestaltung des Pressensystems

Aus der Produkt- und der Funktionsstruktur kann anschließend die in Abbildung 4.29 gezeigte Produktarchitektur gebildet werden. In dieser werden den aus den Teilfunktionen abgeleiteten Komponenten Modulen zugeordnet, welche in ihrer Gesamtheit das Produkt abbilden. Die Produktarchitektur ist Grundlage für die Typengruppen- und Baukastenentwicklung, die in Kapitel 5 näher beschrieben wird. Komponenten und Module, deren Funktionsfähigkeiten im Anschluss der Entwicklung durch einen Prototyp getestet werden, sind in der Produktarchitektur gekennzeichnet. Die Werkzeuge und die Steuerung sowie der Band- und Teiletransport sind nicht Bestandteile der Überprüfung durch den Prototyp.

Maßgebend für die Gestaltung des Pressensystems sind die Module Pressenmodul und Pressenmodul-Positionierung. Sie bilden mit den Funktionen „Bearbeitungsenergie aufnehmen (J)“ und „Aufbau bewegen (S)“ wichtige Produkteigenschaften ab. Weitere Module wie das Untergestell und die Umhausung leiten sich aus den maßgebenden Modulen ab. Ein bereits existierender Pressenantrieb soll ebenfalls verbaut werden, für diesen wird lediglich ein neuer Kraftsensor entwickelt. Die Entwicklung des Kraftsensors ist nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

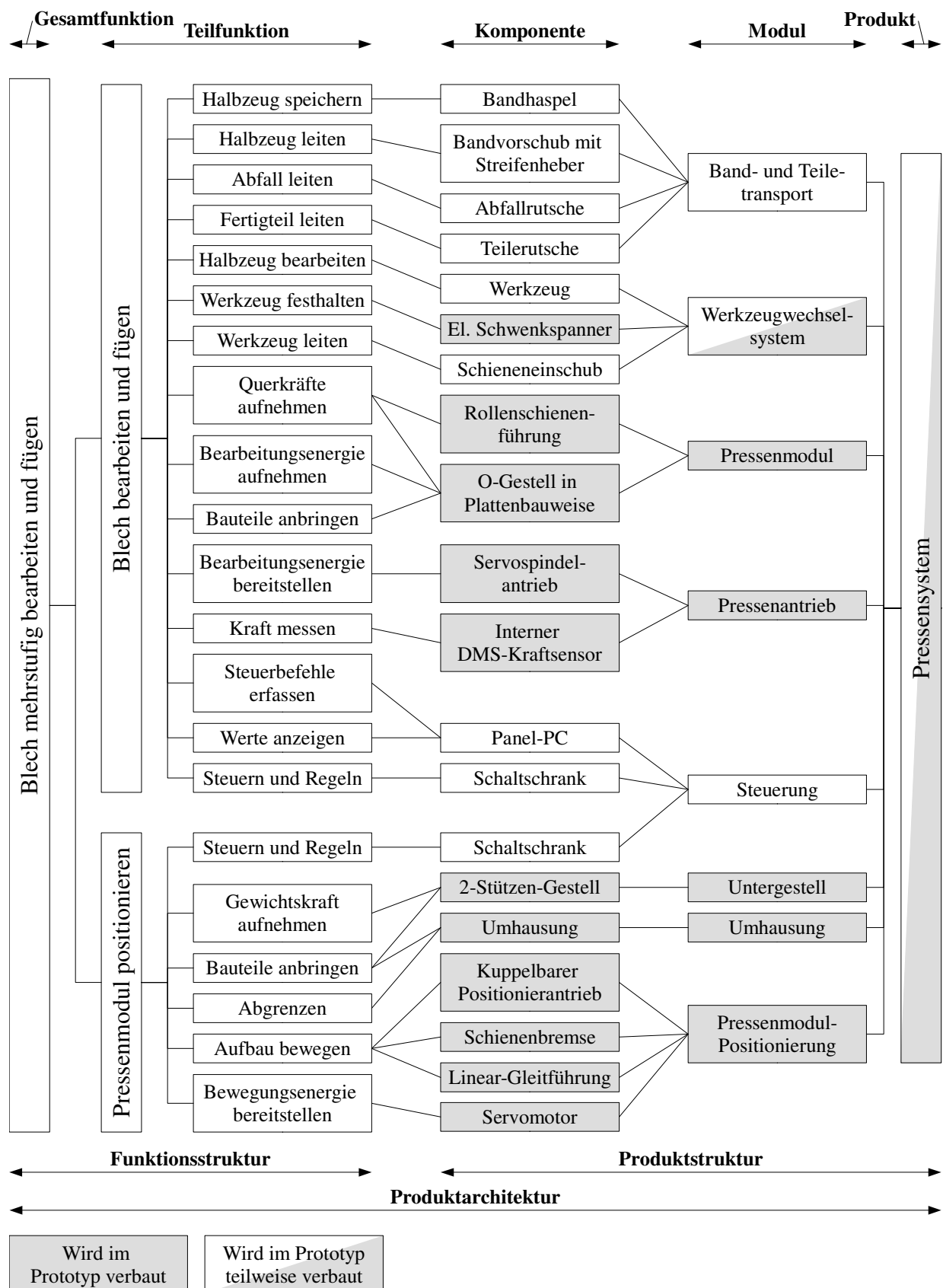


Abbildung 4.29: Produktarchitektur

4.4.2 Gestalten des Moduls „Pressenmodul“

Die im vorherigen Kapitel gefundenen Module für die mechanischen Komponenten des Pressensystems werden im Folgenden gestaltet. Zu diesem Zweck wird die Leitlinie aus Kapitel 2.2.6 berücksichtigt. Außerdem werden nach der VDI 2223 [137 S. 22] verschiedene Prinzipien wie Integral- und Differenzialbauweise, Funktionsintegration und Leichtbau angewendet. Ähnlich zum Vorgehen während der Konzeptphase werden mehrere Vorentwürfe für jedes Bauteil ausgearbeitet, beurteilt und ausgewählt. Die Bauteilgestaltung wird in den folgenden beiden Kapiteln beispielhaft am Modul Pressenmodul und an der Komponente kuppelbarer Positionierantrieb gezeigt. Es werden nur die ausgewählten Entwürfe beschrieben, auf die Beschreibung der verworfenen Vorentwürfe wird verzichtet.

Das Pressenmodul besteht aus dem O-Gestell in Plattenbauweise und der Rollenschienenführung, welche die auf den Stößel wirkenden Querkräfte aufnimmt. Es ist in Abbildung 4.30 zur besseren Sichtbarkeit verdeckter Elemente mit einem Ausbruch dargestellt. Zwei Rahmenplatten (4) werden durch vier Distanzrohre (5), dem Oberträger (1), den beiden Seitenträgern (6) und dem Unterträger (3) verbunden. Die Rollenschienenführung (7) führt den Stößelträger (2). Die Distanzrohre dienen der Verbindung der beiden Rahmenplatten, an den Trägern werden weitere Komponenten angebracht. Auf dem Oberträger werden die Pressenantriebe montiert, deren Stößel werden mit dem Stößelträger verbunden. Am Stößelträger wird unterseitig die obere Werkzeughälfte befestigt, sodass die Stößelkraft von den Pressenantrieben auf das Werkzeug wirken kann. In Blechebene gerichtete Kräfte werden von der Rollenschienenführung aufgenommen. Der Unterträger dient der Befestigung der unteren Werkzeughälfte. Die für die Positionierung des Pressenmoduls notwendigen kuppelbaren Positionierantriebe sowie die Brems- und Führungsschlitten werden mit den Rahmenplatten verbunden. Die Fenster der beiden Seitenträger erlauben einen seitlichen Zugang in den Pressenraum.

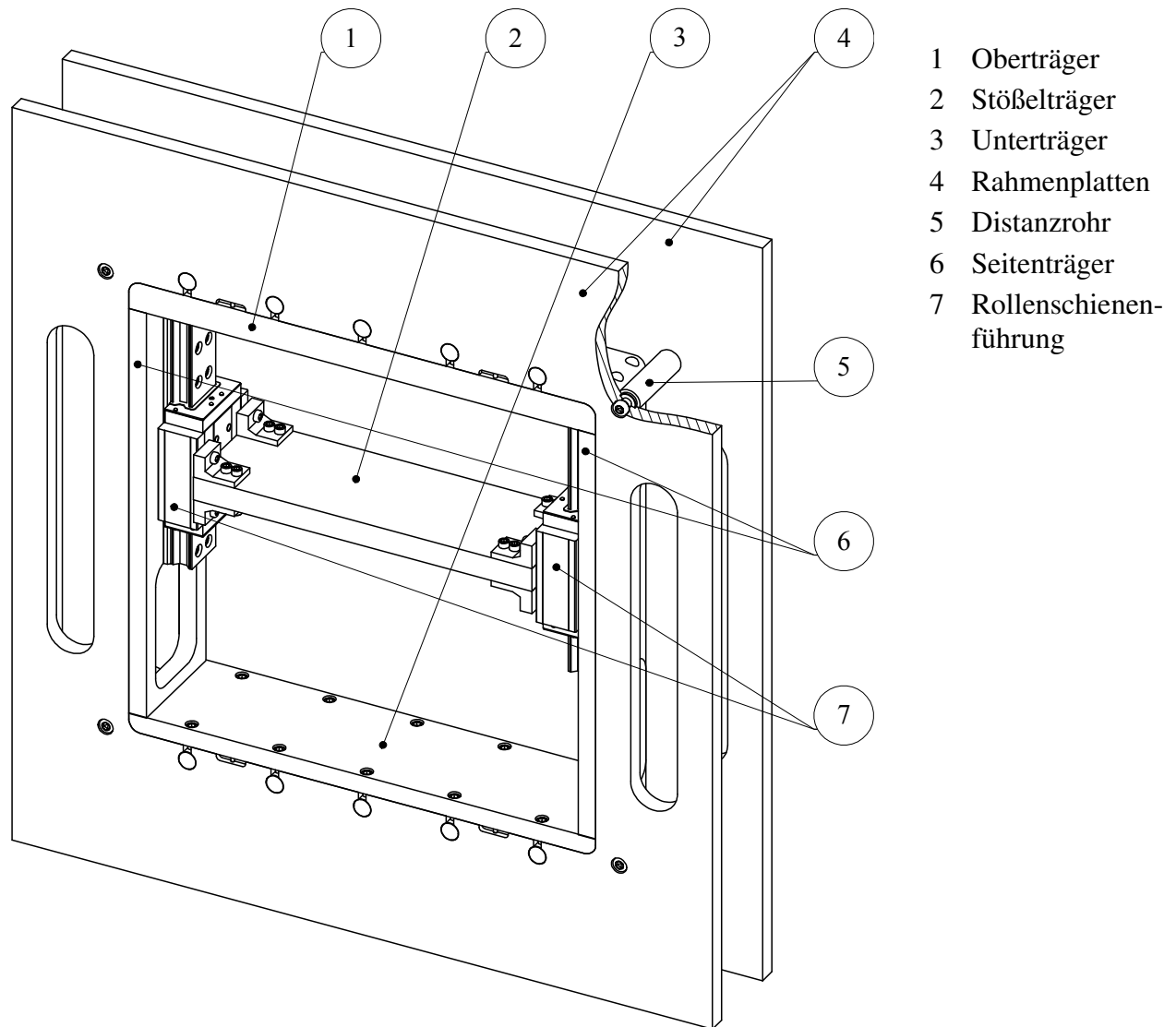


Abbildung 4.30: Entwurf des Pressenmoduls

4.4.3 Gestalten der Komponente „kuppelbarer Positionierantrieb“

Abbildung 4.31 zeigt den Entwurf des Moduls Pressenmodul-Positionierung, zu dessen Komponenten der kuppelbare Positionierantrieb gehört. Das Pressenmodul (4) ist verfahrbar auf einem Untergestell (1) montiert. Die Gewichtskräfte werden von den Schienen der Linear-Gleitführungen (2) aufgenommen, die daneben liegenden Schienenbremsen (3) sperren die Bewegung der Pressenmodule nach dem Positionieren. Um die Kraft zum Positionieren der Pressenmodule aufzubringen, treiben Servomotoren (8) über Umlenkgetriebe (7) Positionerspindeln (6) an. Die zugehörigen kuppelbaren Spindelmutter (5) in den vier Ecken des Pressenmoduls lassen sich in die Drehbewegung der Positionerspindeln gesteuert ein- und auskuppeln, um so bei drehender

Positionierspindel entweder die Drehbewegung in eine Translationsbewegung umzuformen oder trotz drehender Positionerspindel nicht verfahren zu werden. Die kuppelbare Spindelmutter und die Positionerspindel bilden gemeinsam die Komponente kuppelbarer Positionierantrieb.

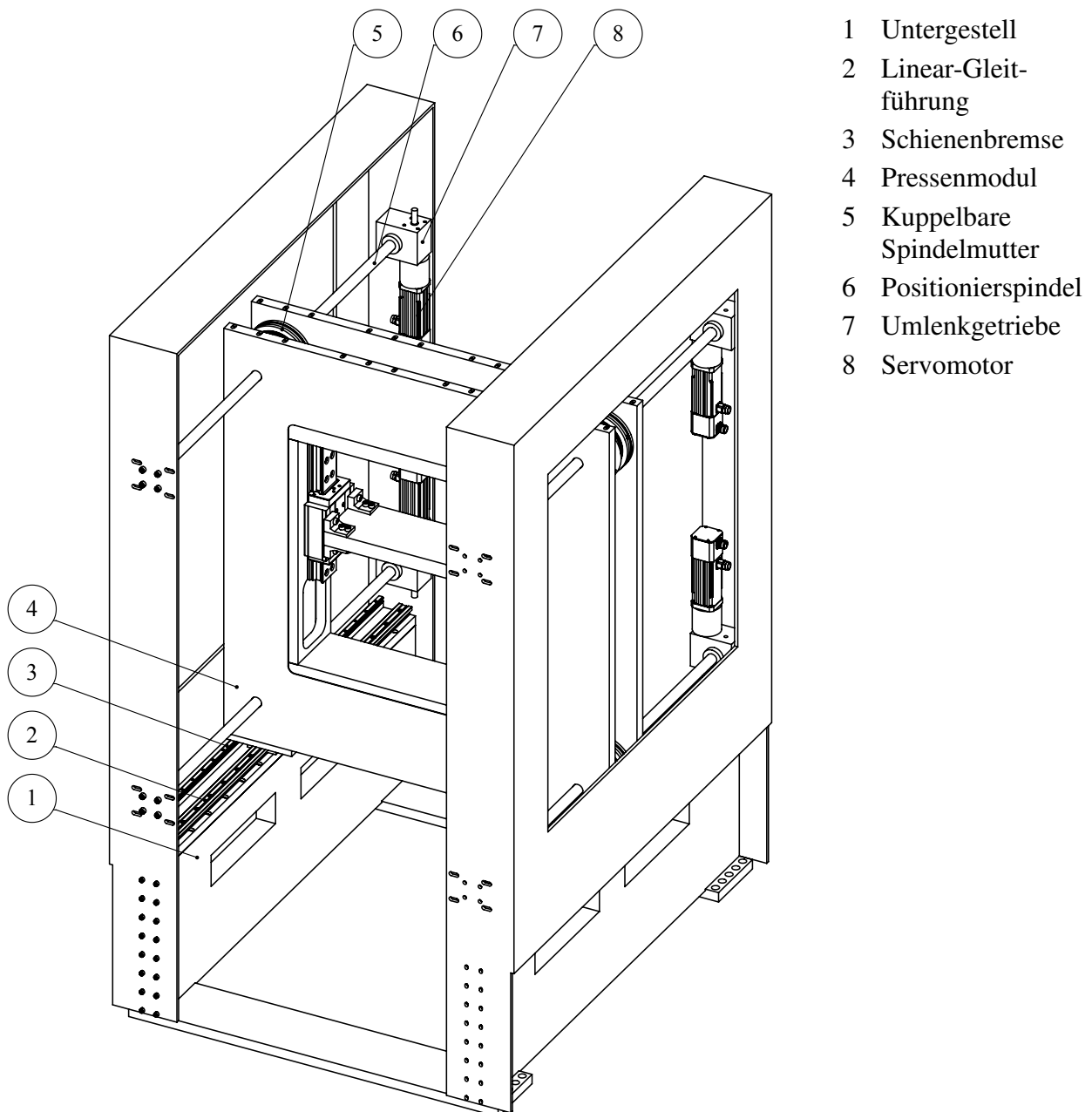


Abbildung 4.31: Aufbau der Pressenmodul-Positionierung

Im Folgenden wird die Funktionsweise und der Aufbau der in Abbildung 4.32 gezeigten kuppelbaren Spindelmutter beschrieben. Zum Verfahren des Pressenmoduls wird Bremse (3) angezogen, während Bremse (8) gelüftet wird. Bei drehender Positionerspindel wird so das Mitdrehen der Spindelmutter (2) verhindert. Durch das Trapezgewinde wird bei drehender Positionerspindel und gleichzeitig feststehender Spindelmutter eine Relativbewegung zwischen Positionerspindel und Spindelmutter erzeugt, welche das Pressenmodul entlang der Spindelachse verschiebt. Soll hingegen das Pressenmodul bei drehender Positionerspindel festgehalten werden, wird Bremse (3) gelüftet und Bremse (8) angezogen. Dadurch wird der Kraftschluss zwischen Spindelmutter (2) und Pressenmodul unterbrochen. Als Folge kann sich die Spindelmutter frei auf der Spindel mitdrehen, sodass trotz drehender Spindel keine Relativbewegung erzeugt und daher das Pressenmodul nicht verfahren wird.

Funktional kann die kuppelbare Spindelmutter in zwei Baugruppen aufgeteilt werden. Die Teile (1) bis (5) dienen der steuerbaren Unterbrechung der Relativbewegung zwischen drehender Positionerspindel und stehender kuppelbarer Spindelmutter. Die Teile (6) bis (9) ermöglichen das steuerbare Klemmen von Positionerspindel und kuppelbarer Spindelmutter, sodass keine Relativbewegung zwischen drehender Spindel und drehender Spindelmutter stattfindet. Durch die entsprechende Steuerung dieser beiden Baugruppen kann die Positionierbewegung ausgelöst und wieder gestoppt werden. Dies geschieht wie folgt:

- Der an einer Rahmenplatte des O-Gestells montierte Flansch (1) verhindert bei geschlossener Bremse (3) das Mitdrehen der Spindelmutter (2). Wird die Spindelmutter an ihrer Rotation gehindert, wird die Drehbewegung der Positionerspindel in eine geradlinige Bewegung der stehenden Spindelmutter gewandelt.

- Diese geradlinige Bewegung findet nicht statt, wenn sich die Spindelmutter (2) auf der Positionerspindel mitdreht. Zu diesem Zweck wird die Bremse (3) gelüftet, womit der Kraftschluss zwischen der Rahmenplatte des O-Gestells und der Spindelmutter unterbrochen ist. Die Gleitlagerbuchse (4) und die Anlaufscheiben (5) ermöglichen bei unterbrochenem Kraftschluss das Durchrutschen der Spindelmutter. Allerdings würde schon bei geringer Erhöhung der Reibung in den Anlaufscheiben, beispielsweise durch Verkippen oder das Eindringen von Fremdkörpern, der Kraftschluss zwischen O-Gestell und Spindelmutter wieder erzeugt werden. Daraus würde eine ungesteuerte Bewegung zwischen dann stehender Spindelmutter und drehender Spindel hervorgehen. Um dies zu verhindern, werden die Komponenten (6) bis (9) verbaut, welche die Spindelmutter (2) mit der Positionerspindel verklemmen. Hierzu wird eine zweite Spindelmutter (9) über eine weitere Bremse (8) in Richtung der ersten Spindelmutter (2) angezogen. Die Bremse (8) soll also keinen Kraftschluss zwischen rotierenden Teilen aufbauen, sondern beide Spindelmuttern (2) und (9) so aneinander ziehen, dass diese auf der Positionerspindel geklemmt werden, um sich mit dieser mitzudrehen. Die Bolzen (6) in den Gleitlagerbuchsen (7) verhindern das Verdrehen der beiden Spindelmuttern und ermöglichen so das Klemmen der zwei Spindelmuttern auf der Positionerspindel.

Für die Auslegung der Pressenmodul-Positionierung wird das notwendige Dauerdrehmoment eines Servomotors der Pressenmodul-Positionierung nach Gleichung 6 berechnet.

Berechnung des erforderlichen Motordrehmomentes der Pressenmodul-Positionierung

$$\begin{aligned}
 M_M &= \frac{\frac{1}{4} F_{Sp} \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{Sp} \cdot i_G \cdot \eta_G} + T_0 = \frac{\frac{1}{4} \cdot m_{PM} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \mu_{Sch} \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{Sp} \cdot i_G \cdot \eta_G} + T_0 \\
 M_M &= \frac{\frac{1}{4} \cdot 1200 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,25 \cdot 0,006 \text{ m}}{2 \cdot \pi \cdot 0,41 \cdot 6 \cdot 0,84} + 0,36 \text{ Nm} \\
 M_M &= 0,53 \text{ Nm}
 \end{aligned} \tag{6}$$

M_M	Erforderliches Motor-Dauerdrehmoment	η_G	Getriebewirkungsgrad
F_{Sp}	Nennbelastung der Spindel	T_0	Getriebe-Leerlaufdrehmoment
p	Spindelsteigung	m_{PM}	Masse eines Pressenmoduls
η_{Sp}	Spindelwirkungsgrad	μ_{Sch}	Reibungszahl der Linear-Gleitführungsschiene
i_G	Getriebeübersetzung		

- 1 Flansch
- 2 Spindelmutter
- 3 Bremse
- 4 Gleitlagerbuchse
- 5 Anlaufscheiben
- 6 Bolzen
- 7 Gleitlagerbuchse
- 8 Bremse
- 9 Spindelmutter

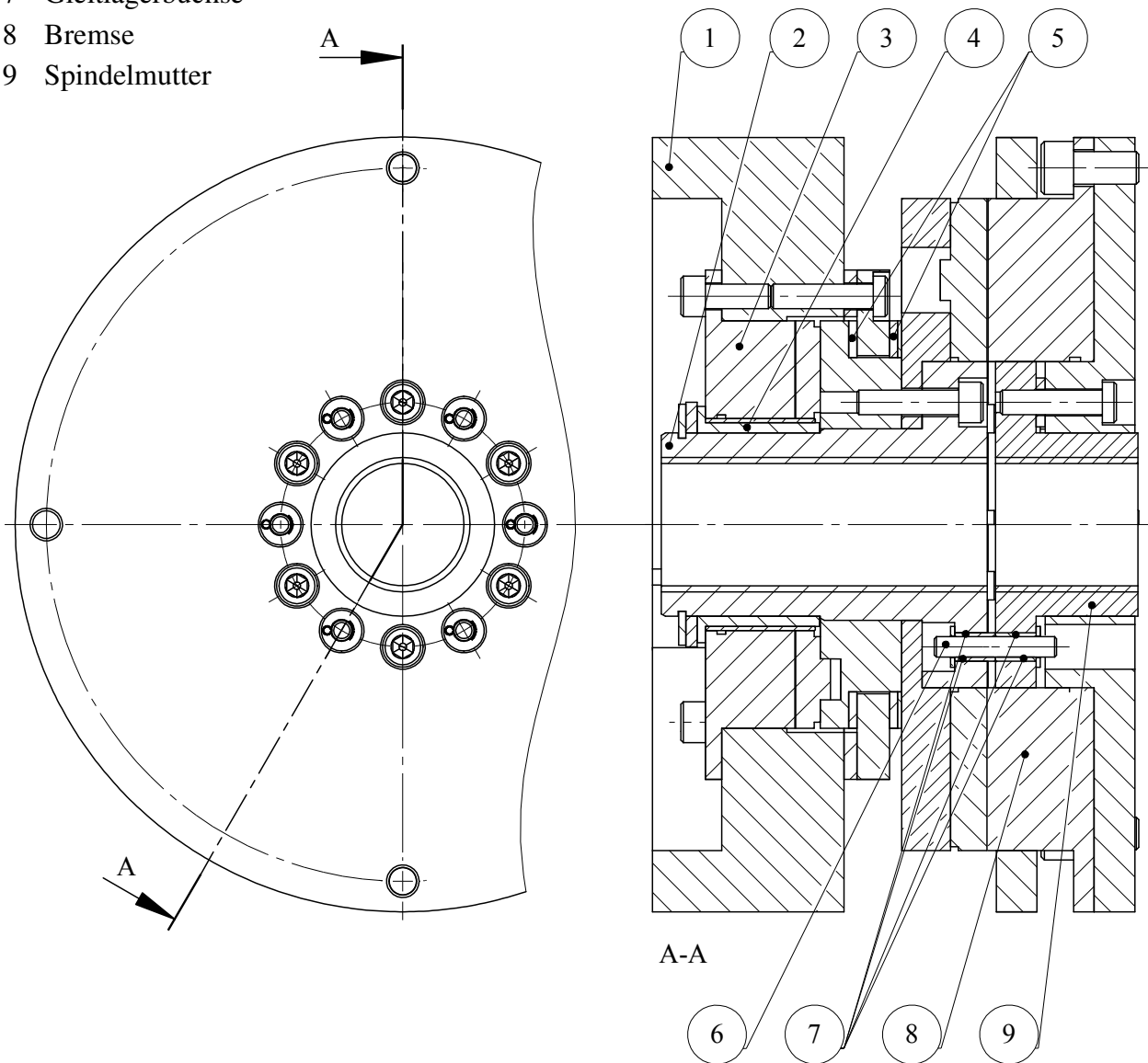


Abbildung 4.32: Entwurf der kuppelbaren Spindelmutter

4.4.4 Gestalten des gesamten Produktes

Nach dem Gestalten der maßgebenden Module werden die noch fehlenden Module gestaltet und so der Gesamtentwurf erstellt. Dieser Vorgang ist iterativ, durch wiederholtes Beurteilen, Verändern und Anpassen entsteht schrittweise ein maßstäblicher Entwurf des Pressensystems. Abbildung 4.33 zeigt den Entwurf des Pressensystem-Prototyps.

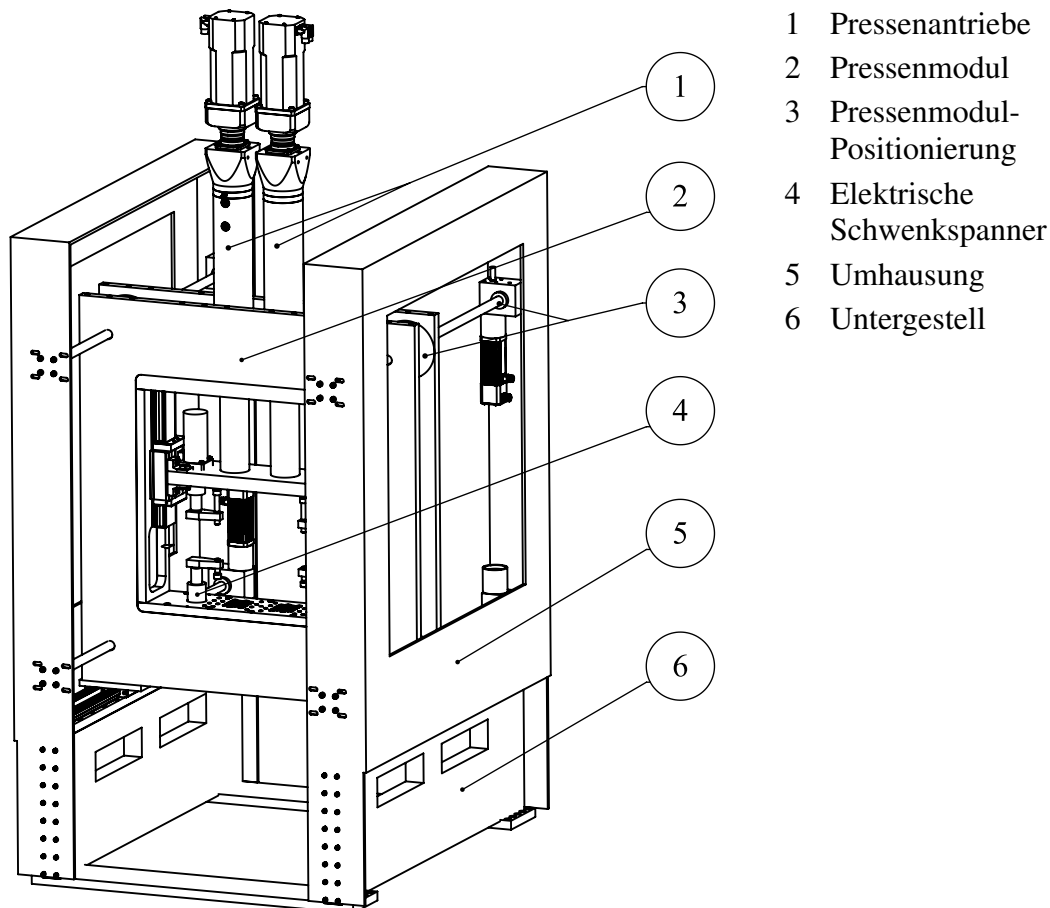


Abbildung 4.33: Entwurf des Pressensystem-Prototyps

Die Module Pressenmodul (2) und Pressenmodul-Positionierung (3) sind durch die noch fehlenden Module und Komponenten ergänzt. Das Untergestell (6) trägt das Pressenmodul und die Umhausung (5). Es besteht aus zwei durch Verbindungsplatten miteinander verbundene Stegplatten. Die Verbindungsplatten lassen sich mit dem Untergrund verankern, andernfalls kann das Pressensystem auf Maschinenfüße gestellt werden. Die Höhe des Untergestells ist durch Ergonomieanforderungen und den notwendigen Bauraum weiterer Komponenten wie Abfallrutschen festgelegt. Die Ausbrüche in den Stegplatten erlauben den Transport des Pressensystems mit einem Gabelstapler. Die Umhausung ist als zweiteilige Schweißkonstruktion ausgeführt, wegen

der beim Positionieren des Pressenmoduls auftretenden Kräfte wird sie mit einem Schubfeldträger versteift. Dieser ist großflächig ausgenommen, um durch ein Fenster den Zugriff in den Pressenraum zu ermöglichen. Für jedes Pressenmodul ist die Aufteilung der Nennkraft auf zwei Pressenantriebe (1) vorgesehen; in Kapitel 6.1.3 werden die dadurch erzielten Effekte beschrieben. Die beiden Pressenantriebe wirken von oberhalb des Pressenmoduls drückend, da der Bauraum unterhalb und neben den Pressenmodulen freigehalten werden soll. Bei größeren Pressenantrieben wird dadurch ein ebenerdiges Aufstellen der Presse ermöglicht. Größere, von unterhalb des Pressenmoduls ziehend wirkende Pressen würden wegen des Bauraumbedarfes ihrer Antriebe für das ebenerdige Aufstellen ein in den Boden eingelassenes Fundament erfordern. Die beiden Pressenantriebe werden daher mit dem Oberträger des Pressenmoduls verschraubt, der Pressenstößel wird am Stößelträger montiert. Am Stößel- und am Unterträger des Pressenmoduls werden außerdem die elektrischen Schwenkspanner (4) als Bestandteile des Werkzeugwechselsystems angebracht.

Die weiteren Komponenten für den Teiletransport und das Werkzeugsystem müssen nach dem in Kapitel 4.3.5 erläuterten Konzept mit den entsprechenden Schnittstellen zum Pressensystem entwickelt werden. Um die Funktionsweise des Pressensystems zu überprüfen, wird im folgenden Kapitel ein Prototyp ausgearbeitet mit den in der Produktarchitektur in Abbildung 4.29 in Kapitel 4.4.1 gekennzeichneten Komponenten und Modulen.

4.5 Ausarbeiten der Konstruktion

Die Ausarbeitung des Pressensystems erfolgt durch die CAE-Programme Creo 2.0 und Solidworks 2013. Bislang nicht berechnete Elemente wie Gewinde oder erforderliche Plattendicken werden ermittelt. Von den schon während der Konzept- und Entwurfsfindung erzeugten CAD-Modellen werden technische Zeichnungen abgeleitet. Bislang fehlende Bauteile und deren Zeichnungsableitungen werden ergänzt durch Festlegen der Angaben von u. a. Werkstoffen, Oberflächen, Härten, Passungen, Toleranzen, Halbzeugen und weiterer Fertigungs- und Funktionselemente wie Freistiche, Freifräsungen oder Zentrierungen. Die Stücklisten lassen sich von den modellierten Baugruppen im CAD-Programm ableiten und für die Warenwirtschaft aufbereiten. Durch den Einsatz von CAE entsteht eine Vielzahl elektronischer Dokumente, die von verschiedenen Abteilungen gelesen und geändert werden müssen. Zu diesem Zweck wird das PDM von Solidworks eingesetzt.

Der Prototyp dient zur Überprüfung von Funktionen des Pressensystems und wird nur einmalig aufgebaut. Er umfasst die Module Pressenmodul, Pressenantrieb, Untergestell, Umhausung und Pressenmodul-Positionierung sowie die Komponente elektrischer Schwenkspanner. Für die Produktion des Prototyps werden auf Basis der Entwürfe die Fertigungs- und Montageunterlagen ausgearbeitet.

4.6 Erproben des Prototyps

Für die Überprüfung verschiedener Funktionen wurde der in Abbildung 4.34 gezeigte Prototyp aufgebaut. Anhand des Prototyps wird die Pressenmodul-Positionierung hinsichtlich Wiederholgenauigkeit, Parallelität und Leistungsaufnahme der Bremsen erprobt. Der Prüfaufbau ist schematisch in Abbildung 4.35 dargestellt.

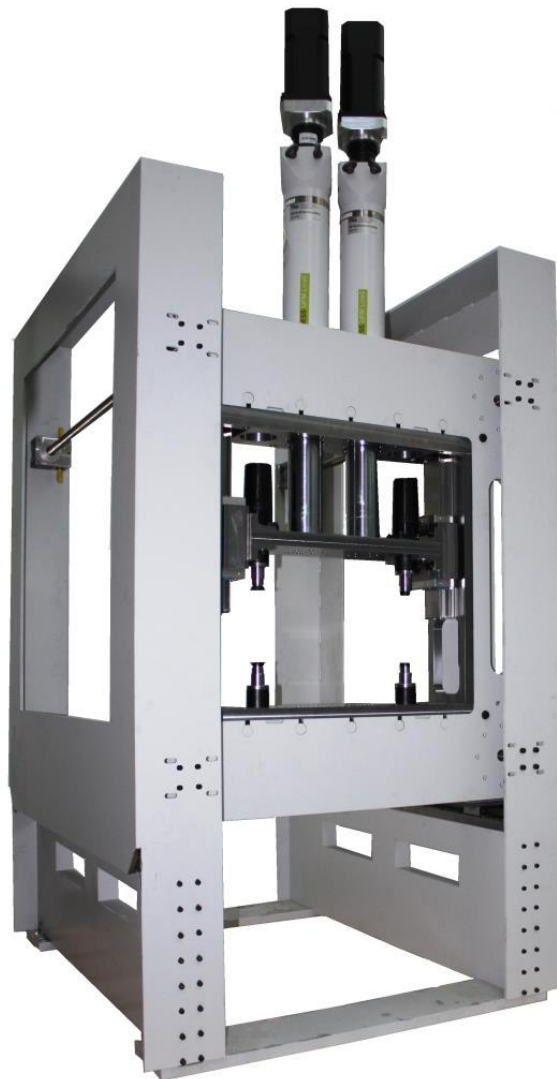


Abbildung 4.34: Fotografie des Prototyps

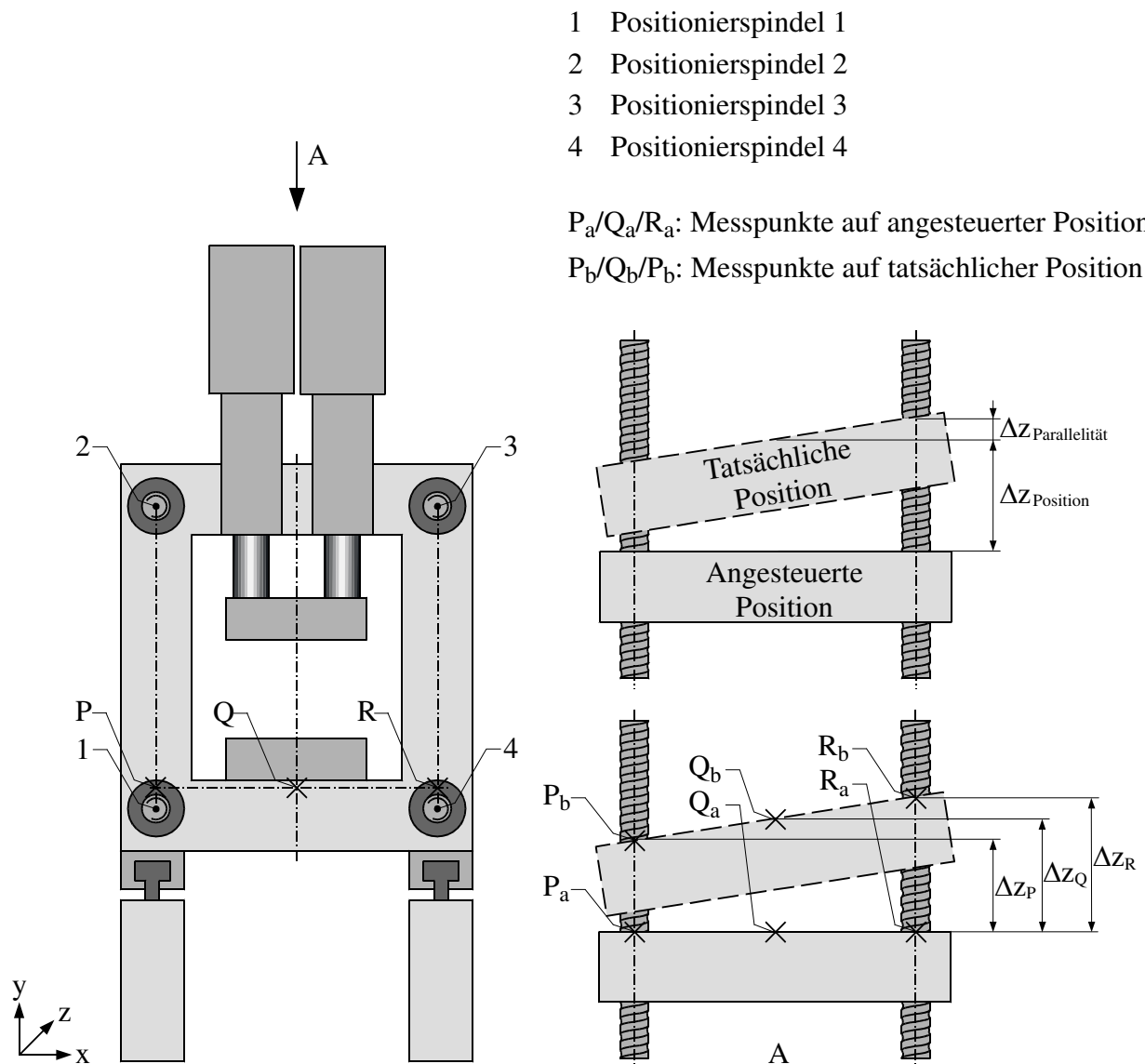


Abbildung 4.35: Prüfaufbau zur Ermittlung von Positionier- und Parallelitätsfehlern

Die Positionier- und Parallelitätsfehler beschreiben die Abweichungen der angesteuerten Position bzw. Ausrichtung des Pressenmoduls nach dem Positioniervorgang zur tatsächlich erreichten Position bzw. Ausrichtung. Beide Fehler werden mithilfe der Punkte P , Q und R ermittelt. Die Punkte P und R liegen auf gleicher Höhe mittig über den Positionierspindeln (1) bzw. (4) auf der Rahmenplatte des Pressenmoduls. Ebenfalls auf der Rahmenplatte des Pressenmoduls liegt der Punkt Q , allerdings ist dieser der Schnittpunkt der gedachten Verbindungslinie der Punkte P und R und der Mittellinie des Pressenmoduls. Der Index a bezeichnet die Lage der Punkte P , Q und R auf dem Pressenmodul in angesteuerter Position, der Index b bezieht sich auf die Lage der Punkte P , Q und R auf dem Pressenmodul in der tatsächlichen Position nach dem Positioniervorgang.

Der Positionierfehler $\Delta z_{Position}$ gibt die Abweichung zwischen der angesteuerten und der tatsächlichen Endposition eines Punktes auf der Mittellinie des Pressenmoduls nach dem Positionieren in z -Richtung wieder. Er wird durch den Abstand der Punkte Q_a und Q_b in z -Richtung ausgedrückt. Nach der in Gleichung 7 gezeigten Beziehung kann zur Ermittlung von $\Delta z_{Position}$ auf die Messung der Verschiebung des Punktes Q verzichtet werden; der Positionierfehler lässt sich durch die Verschiebung der Punkte P und R berechnen.

Berechnung des Positionierfehlers

$$\Delta z_{Position} = \Delta z_Q = \frac{(\Delta z_P) + (\Delta z_R)}{2} \quad (7)$$

Der Parallelitätsfehler $\Delta z_{Parallelität}$ gibt einen Richtungsfehler – die Schiefstellung – des Pressenmoduls in der x - z -Ebene nach dem Positioniervorgang wieder. Er wird durch den Abstand der Punkte P_b und Q_b bzw. der Punkte Q_b und R_b in z -Richtung ausgedrückt. Gleichung 8 zeigt, dass die Bestimmung des Parallelitätsfehlers auf die Verschiebung der Punkte P und R zurückgeführt werden kann. Somit können sowohl der Positions- als auch der Parallelitätsfehler durch Messungen der Verschiebung der Punkte P und R ermittelt werden, wodurch auf die Messung der Verschiebung des Punktes Q verzichtet werden kann. Die Messung an den Punkten P und R vereinfacht den Aufbau der Messvorrichtung verglichen mit der Messung am Punkt Q .

Berechnung des Parallelitätsfehlers

$$\Delta z_{Parallelität} = (\Delta z_Q) - (\Delta z_P) = (\Delta z_R) - (\Delta z_Q) = \frac{(\Delta z_R) - (\Delta z_P)}{2} \quad (8)$$

Zur Ermittlung der Positionier- und Parallelitätsfehler wird das Pressenmodul von den Positionierspindeln 1 – 4 in beide Richtungen bei einer Geschwindigkeit von max. 10 mm/s angetrieben. Als Zielposition wird die Startposition angesteuert. Zwei Messuhren an den Messpunkten P und R ermitteln den Positionierfehler $\Delta z_{Position}$ und den Parallelitätsfehler $\Delta z_{Parallelität}$ in der Teildurchlaufrichtung z .

In fünf Versuchen über je 100 m Fahrweg wurde ein maximaler Positionierfehler $\Delta z_{Position}$ von 1,1 mm gemessen. Somit wurde die geforderte Positioniergenauigkeit von 1 mm geringwertig überschritten. Der größte gemessene Parallelitätsfehler $\Delta z_{Parallelität}$ beträgt 1,3 mm. Die Fehler der Position und der Parallelität können mit der geringen Steifigkeit der Führungen und zu geringer Bremskraft der Bremsen in den kuppelbaren Spindelmuttern erklärt werden.

Um die Positionier- und Parallelitätsfehler zu verringern, werden in nachfolgenden Modellen steifere und längere Führungsschlitten geplant. Außerdem sollen stärkere Bremsen in den kuppelbaren Spindelmuttern eingebaut werden, um ein ungesteuertes Durchrutschen zu verhindern und somit die Positioniergenauigkeit und -zuverlässigkeit zu erhöhen. Sollten höhere Anforderungen an die Genauigkeit von Ort und Lage der Pressenmodule gestellt werden, so können Rollenschienenführungen mit kombiniertem Wegmesssystem verbaut und in einen zusätzlichen Regelkreis eingebunden werden.

Eine Schiefstellung des Pressenmoduls in der y - z -Ebene nach dem Positionieren konnte durch Überprüfungen mit einer Richtwaage nicht festgestellt werden. In den Spindeltrieben mit Trapezgewinde wurde kein Axialspiel gemessen, demzufolge auch kein Umkehrspiel vorhanden ist. Ebenso wenig wurde ein Radialspiel in den Spindeltrieben festgestellt. Bei angezogener Schienenbremse und ausgekuppelter Spindelmutter wird das Pressenmodul trotz der drehenden Positionerspindeln ohne messbare Verschiebung festgehalten. Dabei wird die zulässige Leistungsaufnahme der in der kuppelbaren Spindelmutter verbauten Bremsen nicht überschritten. Das in Gleichung 6 in Kapitel 4.4.3 berechnete erforderliche Motor-Dauerdrehmoment von 0,53 Nm der Pressenmodul-Positionierung wurde über den Motorstrom ausgelesen und im Rahmen der Berechnungs- und Messgenauigkeit bestätigt. Das benötigte Motormoment zur Beschleunigung der Pressenmodule beim Anfahren aus dem Stillstand und beim Umkehren der Bewegungsrichtung ist bedingt durch den Stick-Slip-Effekt der Lineargleitführungen größer als das notwendige Motormoment des mit konstanter Geschwindigkeit bewegten Pressenmoduls. Die Motoren der Pressenmodul-Positionierung wurden nach ihrem Dauerdrehmoment ausgelegt und ermöglichen kurzzeitig hohe Überlasten. Daher konnte das Pressenmodul ohne Einschränkungen trotz des Anstieges der notwendigen Motordrehmomente beim Anfahren und Richtungswechsel des Pressenmoduls zuverlässig positioniert werden.

Zusätzlich wird das Verfahren der Module einzig über die beiden Positionerspindeln (1) und (4) und über die beiden Positionerspindeln (2) und (3) sowie das Verfahren über zwei Positionerspindeln mittels Handkraft getestet. Bei Antrieb der oberen Positionerspindeln (2) und (3) klemmte das Pressenmodul aufgrund des Schubladeneffektes. Das Verfahren über zwei Antriebe ist nur über die unteren Positionerspindeln (1) und (4) möglich. Allerdings kommt es trotz langsam beschleunigtem Anfahren der Positionerspindeln (1) und (4) zu Ruckgleiten in der Linear-Gleitführung, das Pressenmodul pendelt sehr stark entlang der Bewegungsrichtung in der y - z -Ebene. Wegen des starken Schwingens sind die beiden oberen Positionerspindeln (2) und (3) für ein sicheres und zuverlässiges Positionieren der Pressenmodule notwendig.

Werden neben den Positionerspindeln (2) und (3) auch die Motoren zum Antrieb der Positionerspindeln (1) und (4) entfernt und die Antriebswellen der verbleibenden Positionerspindeln mit einer Welle verbunden, so kann das Pressenmodul auch mit Handkraft durch Drehen dieser Verbindungswelle positioniert werden. Das dafür benötigte Moment schwankt sehr stark. Ursache dafür ist der Stick-Slip-Effekt der Lineargleitführungen und das Schwingen des dadurch ruckartig beschleunigten Pressenmoduls.

5 Produktstrukturierung des Pressensystems

Die Absicht der Produktstrukturierung des Pressensystems ist es, das Produkt sowohl aus der Perspektive des Käufers als auch des Produzenten zu verbessern. Auf Grundlage der Produktstruktur wird das Pressensystem zu einer Typengruppe und zu einem Baukastensystem erweitert.

5.1 Zielsetzung und Vorgehensweise der Produktstrukturierung

Das wichtigste Ziel der Produktstrukturierung ist die Erhöhung des Wandlungspotenzials des Pressensystems. Es soll erreicht werden, die Maschine so zu gestalten, dass sie mit geringem Aufwand an wechselnde Produktionsbedingungen angepasst werden kann. Daneben sollen weitere Effekte der Produktstrukturierung, wie sie in Kapitel 2.2.7 beschrieben sind, erzielt werden. Dazu gehören u. a. Wettbewerbsvorteile durch die Möglichkeit der kundenindividuellen Konfiguration des Pressensystems und Vorteile aus Produzentensicht, wie die Vereinfachung der Entwicklung durch Mehrfachnutzung von Komponenten. Um die aufgezählten Effekte zu erreichen, wird das Pressensystem als Baureihe bzw. Typengruppe für verschiedene Nennkräfte und als Baukastensystem aus miteinander kombinierbaren Bausteinen entwickelt.

Zu Beginn der Produktstrukturierung wird eine Baureihe bzw. Typengruppe entwickelt, da das Pressensystem nach der Anforderungsliste aus Pressenmodulen mit verschiedenen Nennkräften bestehen soll. Zu diesem Zweck werden der Bereich und der Stufenabstand der Nennkräfte der Pressenmodule festgelegt. Im Anschluss daran werden die weiteren zu variierenden und die festen Parameter als Folge der Abstufung der Pressenmodul-Nennkraft ermittelt. Das Ergebnis ist eine Typengruppe des Pressensystems mit verschiedenen Nennkräften der Pressenmodule. Im Anschluss der Typengruppenentwicklung wird die Produktarchitektur modularisiert. Auf Grundlage der Komponenten und Module der modularen Produktstruktur wird ein Baukastensystem abgeleitet. Das so entwickelte Baukastensystem wird in einer Baustruktur dargestellt und abschließend eine beispielhafte Baukastenkomposition des Pressensystems dargestellt.

5.2 Ableiten einer Baureihe und einer Typengruppe

5.2.1 Bestimmen der Stufensprünge

Zu Beginn der Baureihenentwicklung stellt sich die Frage nach dem Betrag der Stufensprünge der Nennkräfte der verschiedenen Pressenmodul-Baugrößen. Es können willkürliche Stufenabstände oder mathematisch beschreibbare Reihen gebildet werden. Verschiedene Möglichkeiten, in der Technik zu bevorzugende Reihen zu bilden, werden in der Literatur erläutert [138] [139] [140]. Durchgesetzt haben sich die dezimalgeometrischen Normzahlen nach der DIN 323-1 [141]. Die sogenannten Renard-Zahlen schränken die verfügbare Vielfalt der Zahlen durch sinnvolle Stufungen in Vielfache der n -ten Wurzel der Zahl 10 ein. Eine nach den dezimalgeometrischen Normzahlen gebildete geometrische Reihe besteht aus $n+1$ Gliedern mit n Stufen innerhalb der Zahlen 1 bis einschließlich 10. Nach der DIN 323-1 [141] sind die Normzahlreihen R 5, R 10, R 20, R 40 bevorzugt anzuwenden, in Sonderfällen auch die Ausnahmereihe R 80, dessen Stufensprung $R\ 80 \rightarrow \sqrt[80]{10} \approx 1,03$ beträgt.¹⁰

VIETOR & STECHERT [95 S. 823] empfehlen die Nutzung der Normzahlen zur Stufung von Baureihen. Genannt werden die Vorteile bei der Anpassung der Größenstufung, hier kann durch Verdopplung der Stufenzahl verfeinert werden. Dabei bleiben in der neu gebildeten Reihe die vorherigen Glieder enthalten. Außerdem vereinfachen sich Berechnungen und Konstruktionen durch Wiederholungen. Zusätzlich sinkt die Variantenzahl von Fertigungs- und Messmitteln. Daher geschieht die das System kennzeichnende Staffelung – die Nennkraft pro Pressenmodul – mit dem Stufensprung 1,6. Dieser entspricht dem Stufensprung der Normzahlreihe R 5. Die Endwerte werden gerundet. Es ist technisch sinnvoll, bei einer Nennkraft von 30 kN zu beginnen und wirtschaftlich zweckmäßig, die Nennkraft eines Moduls auf 300 kN zu begrenzen. Pressenmodule mit einer Kraft kleiner als 30 kN decken ein zu geringes Produktspektrum ab. Mit anwachsenden Nennkräften steigen die Kosten der Servospindelantriebe, insbesondere der Spindeln, überproportional stark an, wodurch stärkere Pressenantriebe weitaus höhere Produktkosten verursachen. In besonders hohem Maß wirkt sich dieser Effekt bei Pressenantrieben mit einer Nennkraft ab 150 kN aus. Um höhere Kräfte zu erreichen, können die Pressmodule miteinander kombiniert werden. [136] Dadurch ergibt sich das in Abbildung 5.1 gezeigte Kraftspektrum der mit jeweils zwei Pressenantrieben ausgerüsteten Pressenmodule.

¹⁰ Die Normzahlreihe R 5 geht auf Charles Renard zurück, der damit um 1877 die Vielfalt der Halteseile von Fesselballons minimierte. Nach ihm sind die Renard-Zahlen mit dem Vorsatz R benannt [142 S. 2]. Androuin entwickelte 1917 davon unabhängig durch Betrachtung von Werkzeugmaschinen-Drehzahlen die Normreihen mit der Forderung, dass die Kreiszahl π darin enthalten sein soll [138 S. 13]. Ab Reihe R 10 ist die Normzahl $3,15 \approx \pi$ enthalten.

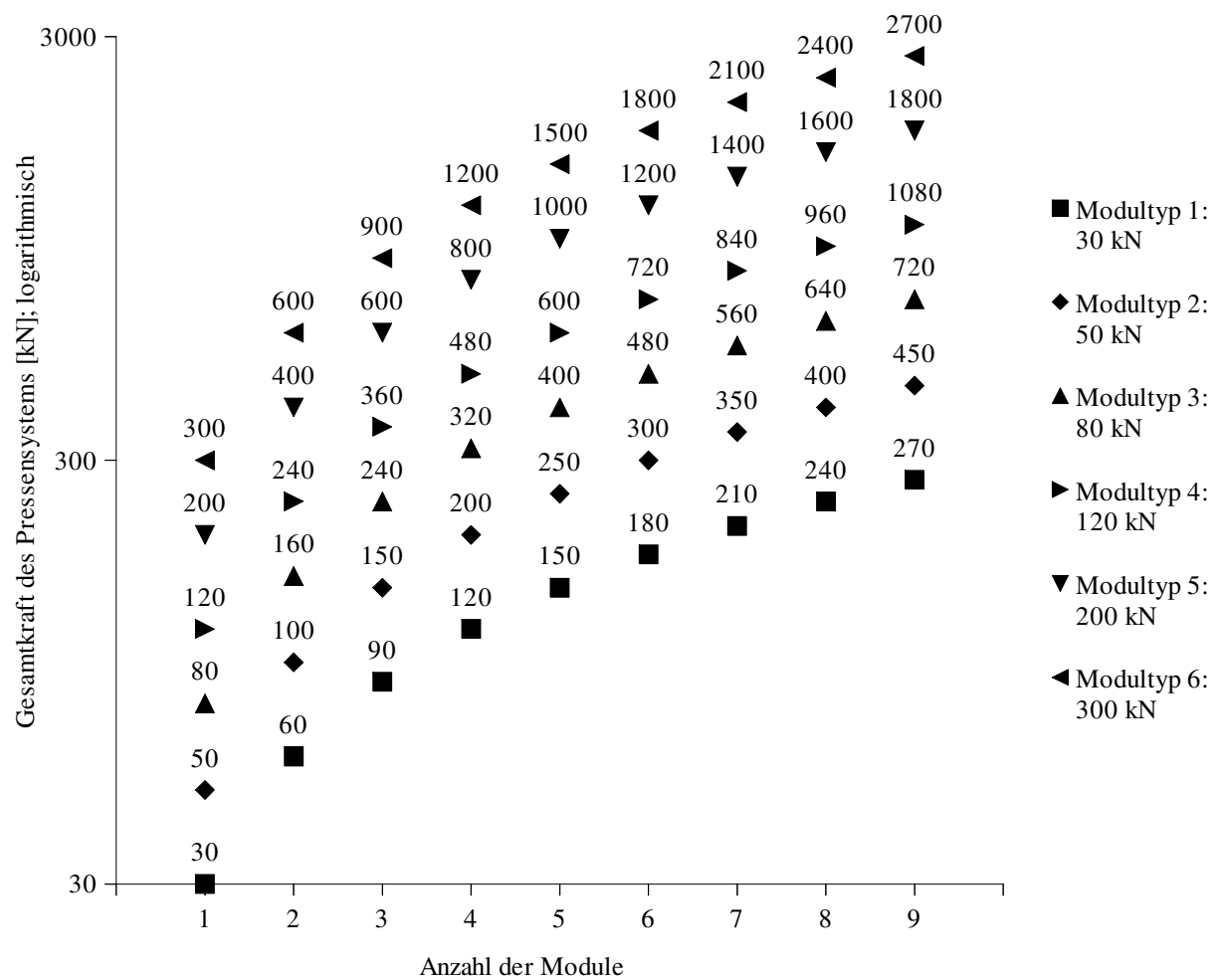


Abbildung 5.1: Kraftbereiche des Pressensystems

5.2.2 Bestimmen der variierenden und der festen Parameter

Nach der Festlegung der Pressenmodul-Nennkräfte als zu staffelnde Parameter und der Stufenabstände zwischen den Baugrößen der Pressenmodule werden die Auswirkungen auf die weiteren Systemparameter untersucht. Es stellt sich die Frage nach den beizubehaltenden und den zu ändernden Parametern der Komponenten und Module. Dabei müssen die Ähnlichkeitsgesetze beachtet werden. Können Baureihen gebildet werden, deren Verhältnisse einer oder mehrerer physikalischer Größen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Baugrößen gleich bleiben, so sind diese ähnlich.

Um eine vergleichbare Werkstoffausnutzung jeder Baugröße hinsichtlich einer physikalischen Eigenschaft zu erreichen, ist die Abhängigkeit der Stufensprünge physikalischer Parameter durch Ähnlichkeitsbeziehungen zu berechnen oder aus Tabellen zu ermitteln [95 S. 822] [143] [144]. Allerdings können übergeordnete Ähnlichkeitsgesetze oder andere Anforderungen zu Abweichungen von Ähnlichkeiten führen [95 S. 829ff]. Dazu wird folgendes Beispiel aus der Baureihenentwicklung des Pressensystems gezeigt: Die Aufbiegung des O-Gestells in Plattenbauweise soll über alle Baugrößen unter der jeweiligen Last konstant bleiben. Dabei soll ein über alle Pressenmodul-Baugrößen gleichbleibend großer Pressenraum umgesetzt werden. Dies weicht vom herkömmlichen Vorgehen ab, die Größe der Pressenräume in Abhängigkeit der Nennkräfte festzulegen, angesichts der Tatsache, dass mit höheren Kräften größere Teile in größeren Werkzeugen gefertigt werden. Das Pressensystem stellt eine Besonderheit dar, da der Werkzeug-einbauraum über alle Baugrößen der Pressenmodule gleich groß bleiben soll, um standardisierte Werkzeuge und Werkzeugwechselsysteme zu ermöglichen. Außerdem können somit Pressenmodule mit unterschiedlichen Nennkräften in einem Pressensystem kombiniert werden. Dadurch können Teilprozesse einfacher ausgewechselt werden, was zur Verbesserung der Wandlungsfähigkeit des Pressensystems beiträgt.

Abbildung 5.2 zeigt das O-Gestell mit den beiden Rahmenplatten (1), die durch Distanzrohre (2) und Trägerplatten (3) miteinander verbunden sind. Rechts im Bild ist eine Rahmenplatte dargestellt mit den zugehörigen Maßen a und b der Gurte (1a) und (1c), den Maßen d , e der symmetrischen Stege (1b), dem Abstand f , den Radien R_a und R_i , der Dicke t der Rahmenplatte, der Dicke c der Trägerplatten sowie der Kraft F . Die Aufbiegung des Gestells wird mittels der Verschiebung u_I an den Punkten P_I bzw. P_3 ermittelt.

F_0 und F_1 und Plattendicken t_0 und t_1 . Das Variieren nur eines geometrischen Parameters zur Entwicklung der Baureihe, in diesem Fall der Plattendicke der O-Gestell-Rahmenplatten, kann die Anpassung umgebender Bauteile vereinfachen. Nach dem Bauzusammenhang in Abbildung 4.27 in Kapitel 4.3.6 müssen in diesem Fall die das Gestell umgebenden Bauteile wie das Untergestell oder die Pressenmodul-Positionierung nicht verändert werden. Die Bedingung ist nur, dass sie die wegen steigender Plattendicken erhöhten Massen der O-Gestelle aufnehmen bzw. bewegen können. Allerdings ergibt sich aus der alleinigen Variation der Plattendicke in Abhängigkeit der Nennkraft der Pressenmodule ein bedeutsamer Nachteil: Um die Baureihe für Kräfte von 30 bis 300 kN abzubilden, wächst die Dicke der Rahmenplatten des O-Gestells von 40 auf 400 mm an. Dadurch wird das Stichmaß entsprechend stark erhöht, sodass es für Pressenmodule mit hoher Nennkraft unakzeptabel groß werden würde. Um dies zu umgehen, werden neben der Plattendicke der Rahmenplatten t auch die Außenmaße axe sowie die Plattendicke der Trägerplatten c variiert.

Nachdem die Variation nur eines Parameters, der Plattendicke t , als nicht zielführend erkannt wird, kann versucht werden, die Baugrößen durch Anpassung aller Hauptabmessungen mit konstanten Stufenabständen zu entwickeln. Die Baureihe wäre dadurch geometrisch ähnlich. Diesem Vorgehen steht allerdings entgegen, dass die Abmessungen $b \times d$ des Pressenraumes über die gesamte Baureihe konstant gehalten werden soll, was zu einer erheblichen Abweichung von der geometrischen Ähnlichkeit führt. VIETOR & STECHERT [95 S. 830] bezeichnen solche Baureihen als halbähnlich. RAPP [123 S. 49] fordert, diese nicht mehr als Baureihen, sondern als Typengruppen zu bezeichnen. Daher soll auch das Pressensystem nicht den Baureihen, sondern den Typengruppen zugeordnet werden. Im folgenden Kapitel wird die Entwicklung der Typengruppe beschrieben.

5.2.3 Entwickeln der Baureihe zur Typengruppe

Es werden drei verschiedene Gestelltypen vorgesehen, wobei jeder Gestelltyp für zwei verschiedene Nennkräfte entwickelt wird. Innerhalb der einzelnen Gestelltypen bleiben die Hauptabmessungen mit Ausnahme der Plattendicke t gleich. Diese Variation der Plattendicke t ist das Ergebnis eines Kompromisses zwischen der Beschränkung der Variantenvielfalt, der Minimierung des Stichmaßes und der effektiven Begrenzung der Aufbiegung der Gestelle unter Nennlast. Die Abmessungen und die Aufbiegung bei Nennlast der Gestelltypen zeigt Abbildung 5.3.

		Nennkraft F [kN]	Plattendicke		Außenmaße $a \times e$ [mm]	Innenmaße $b \times d$ [mm]	Masse m [kg]	Aufbiegung u_1 [mm]
			t [mm]	c [mm]				
Gestelltyp	1a	30	40	40	1280 x 1200	800 x 800	623	0,026
	1b	50	65				972	0,029
Gestelltyp	2a	80	50	50	1600 x 1400	800 x 800	1328	0,029
	2b	120	80				2077	0,030
Gestelltyp	3a	200	100	60	1900 x 1600	800 x 800	3843	0,030
	3b	300	160				6092	0,030

Abbildung 5.3: Abmessungen und Aufbiegung der Gestelltypen

Die Aufbiegung unter Nennlast wurde durch FE-Berechnung ermittelt. Sie beträgt bei allen Gestelltypen höchstens 0,03 mm. Da die Biegung der Trägerplatten ebenfalls in die Aufbiegung eingeht, wird auch die Dicke c der Trägerplatten den Nennkräften angeglichen. Durch Anpassen der Außenmaße a und e wurde erreicht, dass die Plattendicke t vom kleinsten zum größten Gestelltyp nur vervierfacht statt verzehnfacht wurde. Somit konnte das Stichmaß der größeren Pressenmodule minimiert werden. Die Masse der Gestelle steigt annähernd mit dem Stufensprung von 1,6 an, über die verschiedenen Gestelltypen bleibt die Werkstoffausnutzung also konstant.

Im Pressenbau unüblich ist der über alle Gestelltypen gleiche Werkzeugeinbauraum $b \times d$. Dieser ermöglicht standardisierte Werkzeuge, Werkzeugwechselsysteme und Spannsysteme. Jedes Werkzeug kann in allen drei Gestelltypen eingesetzt werden. Pressenmodule mit unterschiedlicher Nennkraft können zur besseren Anpassung an die Teilprozesse eines Bauteils in einem Pressensystem eingesetzt werden. Dies mindert den Konstruktions-, Verwaltungs-, Lager- und Beschaffungskostenaufwand durch Reduzierung der Variantenvielfalt der Werkzeuge und erhöht die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit des Pressensystems. Die Baureihen- und Typengruppenentwicklung wird für die weiteren Komponenten des Pressensystems fortgesetzt.

5.3 Modularisieren der Produktstruktur

Neben der Entwicklung als Typengruppe wird das Pressensystem modular aufgebaut. Als Modularisierung wird die Aufgliederung des Produktes in Module, die möglichst unabhängig voneinander sind, bezeichnet. Diese Aufgliederung lässt sich durch eine modulare Produktstruktur abbilden. Aus dieser lassen sich dann Baukastensysteme, Modulsysteme, Pakete und Plattformen herleiten. Zu Beginn der Modulbildung werden in Abbildung 5.4 Variantentreiber identifiziert. Deren Einfluss auf die Produktarchitektur wird bei der Modularisierung minimiert, um verschiedene Varianten durch Austausch von Modulen erzeugen zu können. [95 S. 268f]

Merkmal	Ausprägung		
Anzahl der Pressenmodule	• Variabel		
Halbzeugspeicher	• Coil	• Platinenspeicher	
Halbzeugtransport	• Bandvorschub	• Roboter	• Transfersystem
Nennkraft pro Pressenmodul [kN]	• 30 • 50	• 80 • 120	• 200 • 300
Sensorik	• Kraftmessung	• Wegmessung	
Sicherheitssystem	• Abgrenzung • Lichtschranke	• Bedienkonsole mit 2-Hand-Bedienung	
Teiletransport	• Rutsche	• Transportband	

Abbildung 5.4: Variantentreiber des Pressensystems

Variantentreiber mit hohem Einfluss auf die Produktarchitektur sind die Nennkraft und die Anzahl der Pressenmodule im Pressensystem. Werden diese Variantentreiber variiert, so erfordert dies die Anpassung besonders vieler weiterer Komponenten. Der Aufstellung der Variantentreiber folgt eine Kategorisierung der Produktbestandteile. Eine Einteilung in Standard (S), Varianz (V) und Option (O) schlagen FELDHUSEN [95 S. 269f] u. a. vor. Standard-Komponenten bleiben in den Produktvarianten immer gleich, Varianzen müssen zur Abbildung bestimmter Eigenschaften ausgewechselt werden und Optionen werden erst bei Bedarf eingefügt. Da möglichst viele Standard-Komponenten geschaffen werden sollen, sind Varianzen und Optionen in eigenen, abgegrenzten Modulen abzubilden.

Im Anschluss an die Kategorisierung der Produktkomponenten werden in einer Kombinationslogik die Beziehungen zwischen allen Komponenten nachgebildet. Eine Kombinationslogik zeigt die Möglichkeiten der Verknüpfungen der Komponenten untereinander, sie dient der Ableitung von Modulen in der Produktstruktur. Die im Anhang dieser Arbeit dargestellte Kombinationslogik ordnet die Verknüpfungen aller Komponenten der Produktstruktur als erforderlich, möglich oder nicht möglich. Eine Kombinationslogik ähnelt einer Konfigurationslogik. Konfigurationslogiken werden zur Analyse der Variantenvielfalt von Produkten genutzt [95 S. 270] [145 S. 245] [146 S. 82]. Durch Konfigurationsmatrizen, die Kombinationen von Merkmalen und deren Ausprägungen wiedergeben, kann die Produktvarianz dargestellt und gepflegt werden [147 S. 336ff].

Eine Gliederung der Komponenten der Produktstruktur in Module kann durch verschiedene Verfahren geschehen, BLEES [148 S. 28ff] stellt diese zusammen. So werden beispielsweise bei PIMMLER [149] die Produktkomponenten durch Bewertung ihrer technisch-funktionalen Beziehungen in Module aufgegliedert.

Um die Komplexität, Subjektivität und die Erfordernis verlässlicher Informationen quantitativer Bewertungen zu umgehen, wird zur Modulbildung des Pressensystems ein eigener, vereinfachter qualitativer Ansatz genutzt. Dazu werden die allgemeinen Kennzeichen von Modulen gesammelt und anschließend die Komponenten in sinnvolle Gruppen gegliedert. Zum Abschluss wird überprüft, ob die gefundenen Gruppen die allgemeinen Kennzeichen von Modulen erfüllen und der gleichen Kategorie angehören. Zusätzlich müssen die gefundenen Gruppen nach der Kombinationslogik erforderlich oder möglich sein und die Variantentreiber nach Abbildung 5.4 abbilden.

Module bestehen nach GÖPFERT [131] aus Komponenten, die in funktionalen, (bau-)räumlichen, zeitlichen, gestalterisch-ästhetischen oder weiteren abstrakten Beziehungen zueinander stehen. Im Hinblick auf den Zweck der Modularisierung ist es sinnvoll, in einem Modul nur Komponenten einer Kategorie zu sammeln. So sollen keine Standard-Komponenten mit Varianten oder Optionen in einem Modul vereint werden. Sind Komponenten nach der Kombinationslogik miteinander kombinierbar, können sie in einem Modul zusammengefasst werden. Die so gefundenen Module zeigt Abbildung 5.5. Alle gefundenen Module erfüllen die allgemeinen Kennzeichen von Modulen. Sie stehen in einem funktionalen und räumlichen Zusammenhang. Außerdem bestehen sie nur aus Komponenten einer Kategorie, bilden die Variantentreiber ab und sind nach der Kombinationslogik zusammengesetzt.

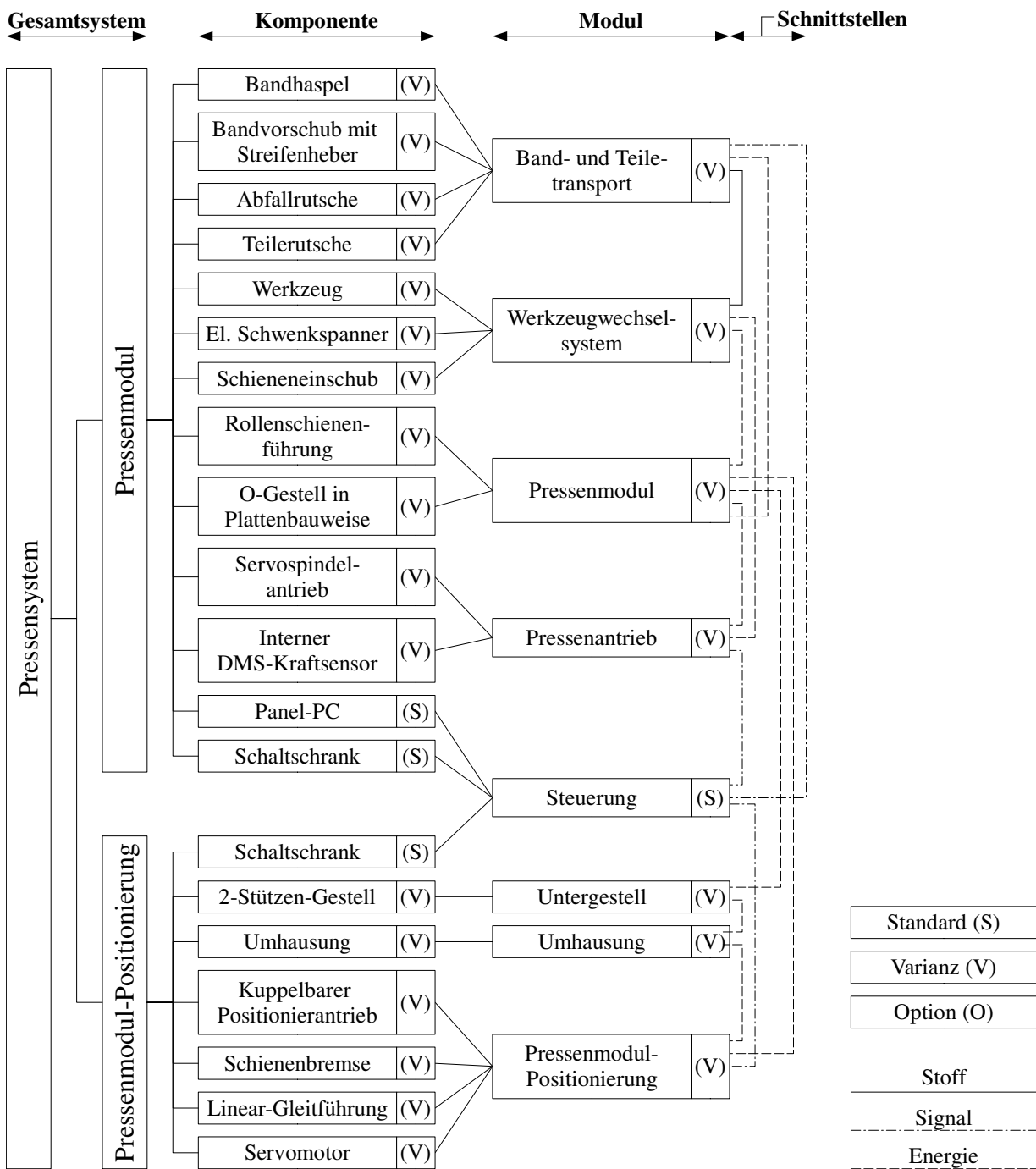


Abbildung 5.5: Modulare Produktstruktur

Im Anschluss werden die Kontakte zwischen den Komponenten, die Schnittstellen, beschrieben. Bei der Betrachtung der Schnittstellen müssen diese in interne und externe unterschieden werden. Die internen Schnittstellen werden durch die Modularisierung bestimmt, die externen Schnittstellen werden auch als Mensch-Maschine-Schnittstellen bezeichnet. Diese werden u. a. von Bedienkonzepten und Sicherheitsvorschriften beeinflusst, nicht aber von der Modularisierung [150]. VIETOR & STECHERT [95 S. 862] unterscheiden zwischen organisatorischen und technischen Schnittstellen, wobei letztere durch die Übertragung von Stoff, Energie und/oder Signalen gekennzeichnet sind. BREIDERT [151 S. 40] bricht die geometrische Form von Schnittstellen hinsichtlich der Lage der Kontaktflächen auf Male-Female-, Mono-Typen, kombinierte Typen und Sondertypen herunter. Die Schnittstellen zwischen den Modulen, aufgegliedert in die Stoff-, Energie- und Signalübertragung zeigt Abbildung 5.5. Die aus der Funktions- und Produktstruktur gebildete Produktarchitektur ist in Abbildung 4.29 in Kapitel 4.4.1 aufgeführt.

Wie die meisten Prozesse der Produktentwicklung ist die Entwicklung der Modul-Schnittstellen iterativ und muss immer wieder auf die Erfüllung der Anforderungen überprüft werden. Sie beginnt in abstrakter Form nach dem Ableiten der Module und wird im Verlauf der Konzeption und Entwurfsfindung immer weiter konkretisiert. Dabei werden die Konzepte und Entwürfe der Schnittstellen miteinander verglichen, bewertet und ausgewählt. Die Festlegung konkreter Kennzeichen wie geometrische Formen und ihre Abmaße oder die elektrische Kabelführung geschieht in der Ausarbeitungsphase. Dabei sollte auf Standards zurückgegriffen werden, beispielsweise sollten keine eigenen BUS-Typen zur Informationsübertragung geschaffen oder Schraubverbindungen außerhalb der Regelgewinde konstruiert werden.

5.4 Entwickeln des modularen Baukastens

Das Pressensystem wird als Mischform aus Modulsystem und Baukastensystem entwickelt. Beispielsweise bilden die Pressenantriebe abgegrenzte, nichtaustauschbare Module mit gleicher Funktion. Um die Wandlungsfähigkeit der Maschine zu erhöhen, wird ein Baukasten entwickelt. Über entsprechende Schnittstellen wird der Austausch von Systemen und die Erweiterung des Pressensystems durch Zusatzsysteme wie Messeinrichtungen ermöglicht. Außerdem wird die Anzahl der Pressenmodule variabel gehalten, sodass die Nennkraft des Pressensystems durch die Anzahl und Nennkräfte der Pressenmodule bestimmt wird. Das Pressensystem lässt sich dann den modularen Baukastensystemen nach der Definition von SCHUH u. a. [147 S. 135] zuordnen. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass Bausteine mit gleichen Schnittstellen auch mehrfach innerhalb eines Systems verbaut werden. Als Beispiele werden Schaltschränke und Gerüste genannt. Modulare Baukästen ermöglichen durch Austausch oder Vervielfältigung ihrer Bausteine die Abbildung verschiedener Produkte eines Produktbereiches.

Die Entwicklung eines Baukastens erfordert eine modulare Produktstruktur, wie sie im vorherigen Kapitel 5.3 gebildet wurde. VIETOR & STECHERT [95 S. 844ff] erläutern das weitere Vorgehen. Zu Beginn werden die Ziele der Baukastenentwicklung geklärt. Abbildung 5.6 ordnet die Motivation für die Baukastenentwicklung in die von RENNER [128 S. 118] vorgeschlagene Darstellung der möglichen Stoßrichtungen zur Baukastenentwicklung ein.

Im Vordergrund der Baukastenentwicklung des Pressensystems steht die Erhöhung der Wandlungsfähigkeit. Der Kunde soll ein vielseitiges und anpassungsfähiges Produkt erhalten, welches seinen Bedürfnissen entspricht und schwankenden Einflussgrößen angepasst werden kann. Um die Vielfalt der Bausteine einzugrenzen, soll die Nennkraft des Gesamtsystems durch die Variation der Anzahl gleicher Bausteine – der Pressenmodule – verändert werden. Für eine wandelbare Anordnung der Teilprozesse sollen die Pressenmodule unabhängig voneinander positionierbar sein und miteinander kombiniert werden können. Zum Erreichen größerer Kräfte werden koppelbare Pressenmodule eingebaut, die mit geringem Aufwand durch zusätzliche Pressenmodule ergänzt werden können. Außerdem soll der Folgeaufwand für die Weiterentwicklung gesenkt werden. Die Ableitung neuer Varianten des Pressensystems soll vereinfacht werden, besonders im Hinblick auf die Organisation der einzelnen Teilentwicklungen. Dies erfordert eine genaue Definition der Schnittstellen.

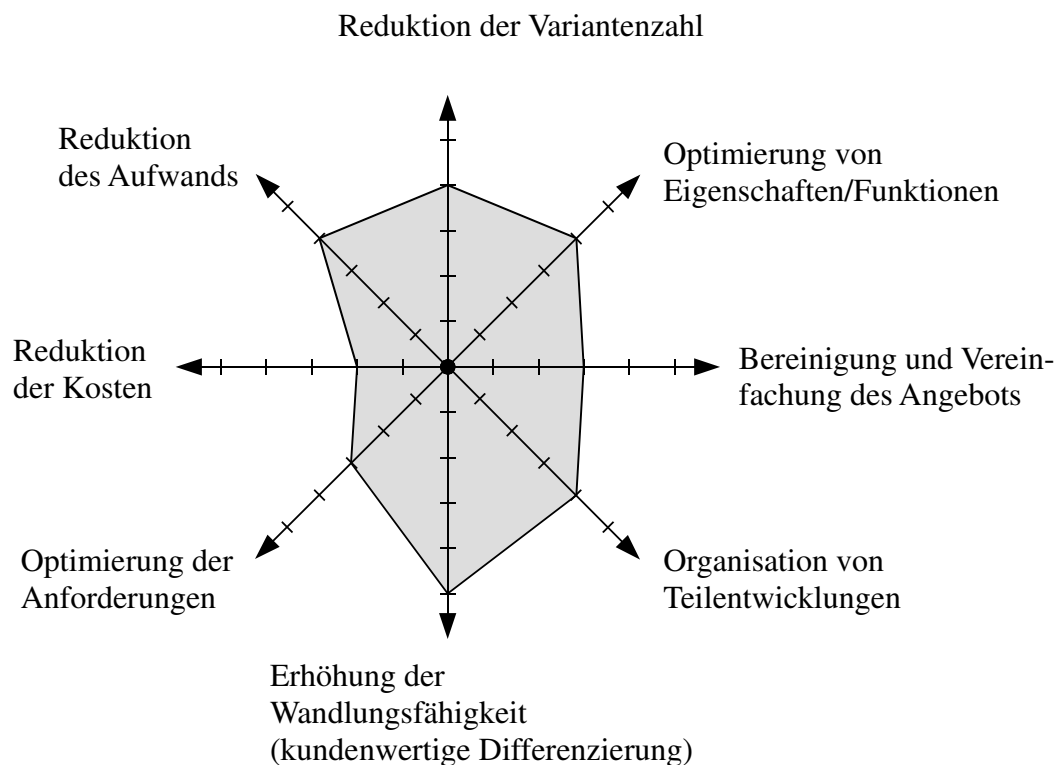


Abbildung 5.6: Motivation der Baukastenentwicklung in Anlehnung an RENNER [128 S. 118]

Gemäß dieser Zielsetzung kann der Baukasten in die aus verschiedenen Quellen zusammengestellte Systematik von STECHERT [152 S. 27] eingeteilt werden. Das Pressensystem soll als offener Anwenderbaukasten mit horizontaler Verflechtung der strukturgebundenen Bausteine entworfen werden. Für den Anwender ist ein solches System in den Grenzen der Schnittstellen und des Bauraumes beliebig konfigurierbar. Die Bausteine können in verschieden ausgeführten Pressensystemen eingesetzt werden, allerdings belegen sie innerhalb der Produktstruktur immer die gleiche Position.

Die modularisierte Produktarchitektur aus Kapitel 5.3 wird nach VIETOR & STECHERT [95 S. 842ff] durch die Einteilung in Grund-, Hilfs-, Sonder- und Anpassfunktionen ergänzt. Die Module bestehen nur aus gleichartigen Komponenten: Standard, Varianz oder Option. Daher lassen sich Muss-, Kann- und Nicht-Bausteine aus den Modulen ableiten. Muss-Bausteine sind im Gegensatz zu Kann-Bausteinen grundsätzlich für die Funktion des Pressensystems notwendig. Nicht-Bausteine bezeichnen Komponenten zur besonderen Anpassung der Maschine, die nicht als Bausteine gestaltet sind und daher das Baukastensystem zum Mischsystem verändern.

Nachdem die Bausteine identifiziert wurden, werden die Bausteinvarianten zusammengetragen. Dabei ist zu prüfen, ob Wirkprinzipien, die im Auswahlverfahren in Abbildung 4.24 in Kapitel 4.3.4 nicht grundsätzlich ausgeschlossen wurden, da sie zwar die Forderungen der Anforderungsliste erfüllen, aber bei der weiteren Auswahl durch die Auswahlliste oder das technisch-wirtschaftliche Bewerten anderen Lösungen unterlegen sind, als Kann-Bausteine entworfen werden. Ein Beispiel dazu sind die Wirkprinzipien für die Teilfunktion „Steuerbefehle erfassen (N)“. Aufgrund der höheren Kosten wurde das Wirkprinzip Bedienkonsole zugunsten des Panel-PCs verworfen. Da Bedienkonsolen als Zusatzbausteine auch Vorteile wie die Möglichkeit der Umsetzung des Sicherheitskonzeptes durch Zwei-Hand-Bedienung gegenüber Panel-PCs aufweisen, werden sie als zusätzliche Kann-Bausteine im Baukasten berücksichtigt. Ein weiteres Beispiel für die Wiederaufnahme verworfener Lösungen ist das Wirkprinzip Lichtschranke für die Teilfunktion „Abgrenzen (L)“, welches ebenfalls in der Konzeptphase aufgrund der höheren Kosten verworfen wurde. Ebenso wie Bedienkonsolen sollen auch Lichtschranken als zusätzliche Kann-Bausteine angeboten werden. Weitere Varianten werden aus der Typengruppenentwicklung in Kapitel 5.2 abgeleitet. Der Baukasten wird, wie in Abbildung 5.7 dargestellt, in einer Baustruktur [95 S. 852] wiedergegeben.

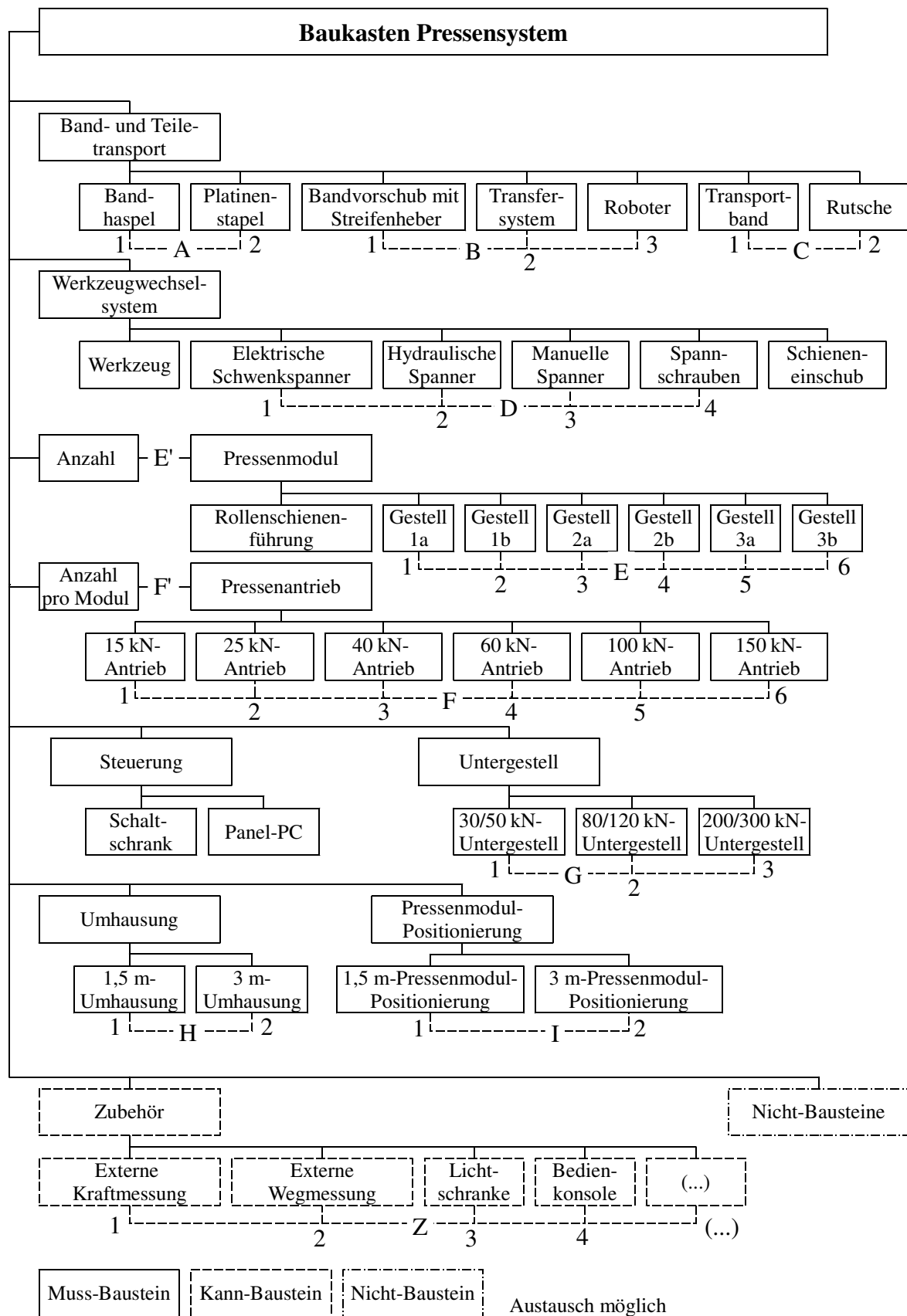


Abbildung 5.7: Baustruktur des Pressensystems

Abbildung 5.8 zeigt ein aus dem Baukasten aufgebautes Pressensystem. Das dargestellte Pressensystem ist aus fünf Pressenmodulen zusammengesetzt. Jedes dieser Pressenmodule besteht aus einem Gestell vom Typ 1b (4), welches mit jeweils zwei 25 kN-Pressenantrieben (5) bestückt ist. Die fünf Pressenmodule sind auf einem 30/50 kN-Untergestell (10) montiert und können innerhalb der 1,5 m-Pressenmodul-Positionierung (7) verfahren werden. An der dazu passenden 1,5 m-Umhausung (9) sind Lichtschranken (6) montiert, um ein Eingreifen in den Arbeitsraum der Presse registrieren zu können. Die Werkzeuge werden mittels elektrischer Schwenkspanner (8) in den Pressenmodulen eingespannt. Eine zusätzliche externe Wegmessung (3) am Pressenstößel ermöglicht feinere Messungen des Stößelhubes. Das Blechband wird in einer Bandhaspel gespeichert, durch einen Bandvorschub mit Streifenheber (2) werden die Teile während der Bearbeitung durch das Pressensystem transportiert. Die Bandhaspel ist in der Abbildung nicht dargestellt. Abfälle und Fertigteile werden über Rutschen (1) aus dem Pressensystem abgeführt.

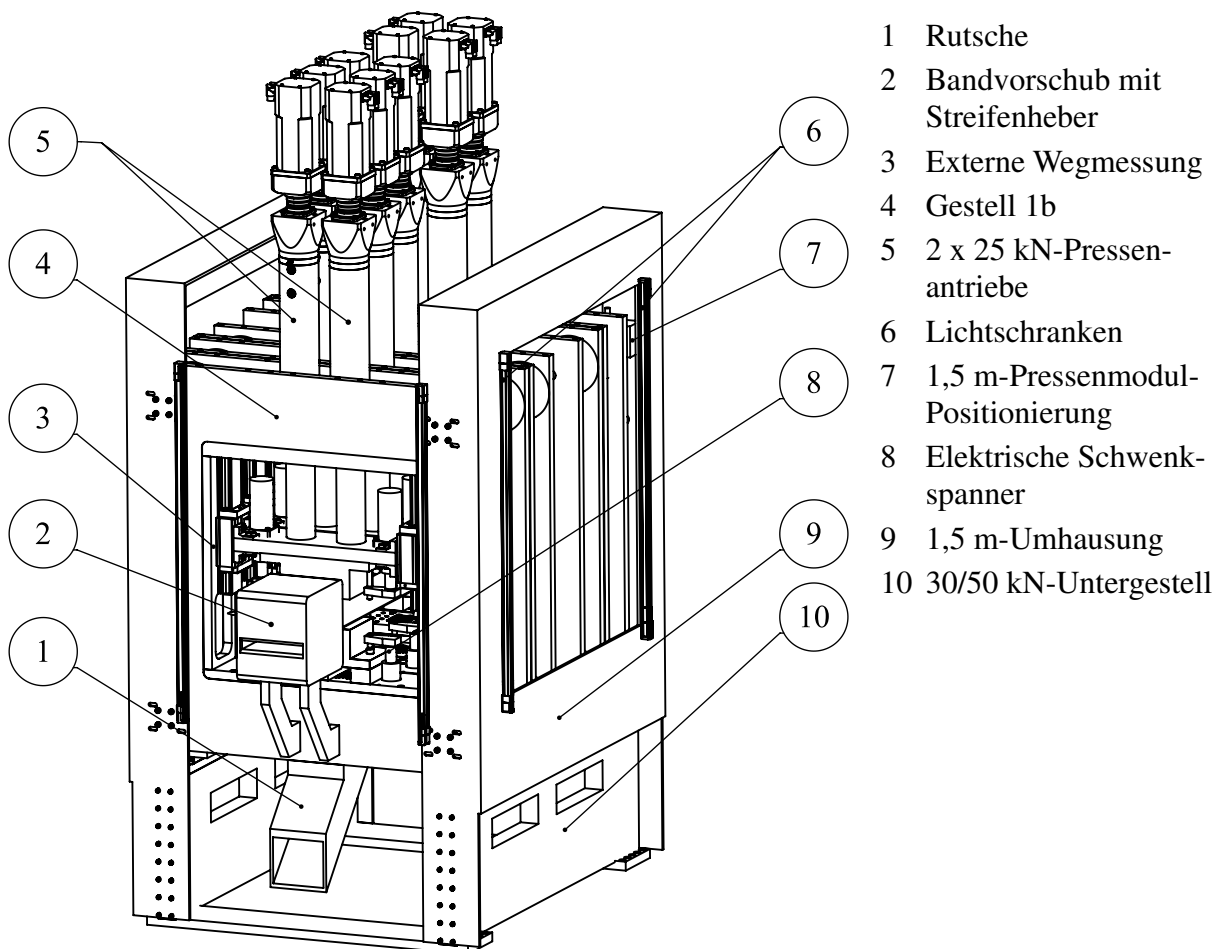


Abbildung 5.8: Beispielhafte Baukastenkomposition des Pressensystems

6 Bewertung und Einordnung des Pressensystems

Das Pressensystem wurde als wandlungsfähige, modulare Mehrstufenpresse mit mehreren Stößeln mit Servomotor-Spindelantrieben und variablen Stufenabständen entwickelt. Es fertigt Teile mittels Umformen, Schneiden und Fügen, zusätzlich wird die Integration weiterer Verfahren ermöglicht. Aus dem Aufbau des Pressensystems lassen sich Eigenschaften ableiten, die im Folgenden erläutert werden. Aus diesen Eigenschaften werden anschließend im Kapitel 6.2 die Einsatzgebiete des Pressensystems herausgebildet.

6.1 Bewertung der Technologie

6.1.1 Flexible Stößelbewegungsprofile durch Servospindelantrieb

Der Antrieb der Pressen über Servomotoren und Spindeltriebe erlaubt eine umfassende Anpassung an den Fertigungsprozess und die Werkzeuge durch die einstellbaren Parameter Geschwindigkeit und Beschleunigung. Aufgrund der Möglichkeit, Teilprozesse zu separieren, kann dieser Vorteil im Gegensatz zur Fertigung mit Folgewerkzeugen auch für kritische Teilprozesse genutzt werden. Neben der gesteigerten Ausbringung bewirken prozessangepasste Stößelbewegungsprofile eine Verringerung der Auftreffgeschwindigkeit des Werkzeuges und beeinflussen dadurch die Vibrations- und Lärmbelastung, die Teilequalität und den Werkzeugverschleiß positiv. Im Vergleich zu konventionellen Pressen müssen bei Servopressen also nicht mehr der Prozess und die Werkzeuge an die Presse angeglichen werden, das Stößelbewegungsprofil ist in den physikalischen Grenzen der Antriebe frei programmierbar. Außerdem kann die Servopresse unter Last angehalten und in beide Richtungen verfahren werden. Diese Möglichkeiten erleichtern das Tuschieren und Einarbeiten von neuen Werkzeugen in der Presse. Zusätzlich entfällt bei Servospindelpressen der Nachteil von Servoexzenterpressen: Sie stellen die Nennkraft während des gesamten Hubes zur Verfügung, die Abhängigkeit der Stößelkraft vom Stößelhub entfällt. Das Stößelbewegungsprofil kann vollständig an die Anforderungen des Prozesses – Scherschneiden, Tiefziehen, Biegen, Prägen, Fügen, usw. – angepasst werden. Dies erhöht die Prozesssicherheit, Ausbringung und Teilequalität. [10 S. 521ff] [51] [61]

Beispielsweise kann der Schnittschlag in Schneidprozessen durch eine Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit verringert werden. So wird der Glattschnittanteil durch einen abgebremsten Schnitt auf Servoexzenterpressen im Vergleich zum Schnitt mit konstanter Schnittgeschwindigkeit leicht erhöht [153]. Versuche von LANDOWSKI [154] zeigen, dass mit einer Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit deutliche Verbesserungen der Schnittflächenqualität einhergehen und

somit nachfolgende Bearbeitungsschritte überflüssig werden. Durch die freie Programmierung können Schwingungen, die üblicherweise beim Trennen und Rückfedern des Werkstoffes sowie bei der Bewegungsrichtungsänderung in den Totpunkten auftreten, erheblich reduziert werden. Dadurch wird die Lärmbelastung gemindert und der Werkzeug- und Führungsverleiß reduziert. Der arbeitsfreie Rückhub vom UT aus kann an die erforderliche Werkstücktransportzeit angepasst werden. Weitere Untersuchungen von LANDOWSKI [154] ergeben Vorteile durch eine Anpassung der Geschwindigkeit während des Tiefziehens.

Die Möglichkeiten verbesserter Biegeprozesse durch Anpassen des Stößelbewegungsprofils sammeln OSAKADA u. a. [51 S. 659f]. Um das starke Rückfedern verschiedener Teile aus hochfestem Stahl beim V-Biegen zu beherrschen, wurden Servopressen eingesetzt. Mit diesen konnte durch geringes Überbiegen und einer Haltephase das Rückfedern der Teile minimiert werden. In einer weiteren Anwendung wurden Servopressen beim U-Biegen genutzt. Durch eine Rückhubbewegung im Prozessverlauf konnte auch in diesem Fall das Rückfedern des Bauteils gesenkt werden. OSAKADA u. a. zeigen anhand weiterer Beispiele, wie durch prozessangepasste Stößelbewegungsprofile auf Servopressen verschiedene Fertigungsschritte verbessert werden können. Betrachtet werden z. B. Tiefzieh- und Scherschneidprozesse und die Vorteile pulsierender Stößelbewegungen.

GRUNER und MAUERMANN [153] erörtern die Möglichkeiten von Servospindelpressen: Durch Haltezeiten im UT¹¹ sind u. a. Presshärten oder aktive lokale Umformprozesse durch eine Zieheinrichtung möglich. Darüber hinaus lassen sich auf Servospindelpressen beispielsweise mittels Durchsetzfügen aus eingeschleusten Bauteilen Baugruppen fertigen. Ebenso können zusätzliche Teilprozesse wie Reinigen oder Beschriften innerhalb der Presse integriert werden.

Da Servopressen ohne Schwungrad arbeiten, ist der Energiebedarf unmittelbar leistungsabhängig und es entstehen Bedarfsspitzen. Diese können durch verschiedene Maßnahmen wie Netzzurückspeisung, Nutzung von Kondensatoren oder dem Energieaustausch zwischen verschiedenen Pressen geglättet werden. Die Flexibilität der Servotechnologie bietet nicht nur Vorteile für den Prozess und die Maschine, daneben kann auch der Energieverbrauch der Presse gesenkt werden. Energieoptimierte Stößelbewegungsprofile verbrauchen 10–20 % weniger Energie im Vergleich zu nicht optimierten Stößelbewegungsprofilen [26 S. 452ff].

11 Der Begriff unterer Totpunkt bezeichnet bei weggebundenen Pressen den unteren Umkehrpunkt des Pressenantriebes. In diesem Punkt ist die übertragbare Kraft theoretisch unendlich hoch. Obwohl ein Totpunkt im engeren Sinn bei Spindelpressen nicht auftreten kann, ist der Begriff Totpunkt für die Bezeichnung der Umkehrpunkte auch bei Spindelpressen üblich. [155 S. 353]

6.1.2 Begrenzte Nennkraft und Hubzahl durch Servospindelantrieb

Nachteilig ist bei einachsigen Servospindelpressen der im Vergleich zu weggebundenen und hydraulischen Pressen geringe Kraftbereich, der durch die Tragfähigkeit der Kugel- und Rollengewindetriebe sowie deren Axiallagerung begrenzt wird. Die Kosten der Gewindetriebe wachsen mit zunehmender Baugröße überproportional an. Daneben steigen auch die Massenträgheitsmomente und Baugrößen der Motoren bei steigenden Leistungsdaten stark an. Obwohl durch die geringe Massenträgheit der Antriebskette hohe Beschleunigungen erreicht werden, sind bedingt durch die Drehrichtungswechsel der Spindel die erreichbaren Hubzahlen geringer als in Schnellläuferpressen mit durchlaufendem Exzenterantrieb. Da durch höhere Spindelsteigungen zwar die Geschwindigkeiten steigen, dabei aber die erreichbaren Kräfte geringer werden, muss ein Kompromiss aus Kraft und Geschwindigkeit gefunden werden. Naturgemäß sinken die erreichbaren Hubzahlen auch mit steigendem Stößelhub, wie Abbildung 6.1 am Beispiel einer Antriebskette mit 15 kN Nennkraft zeigt [136].

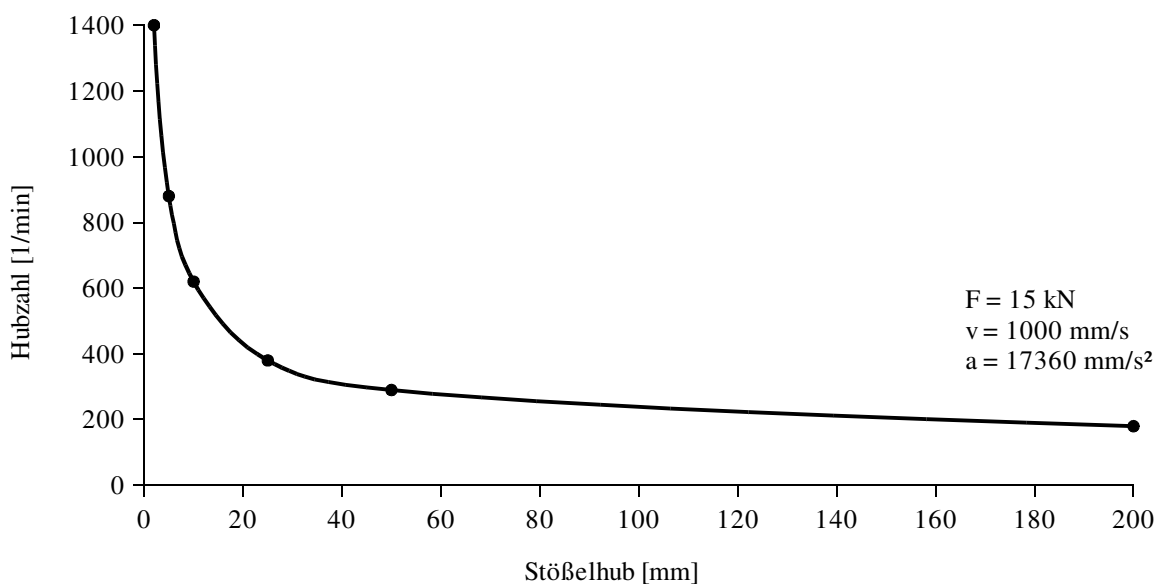


Abbildung 6.1: Zusammenhang zwischen Hubzahl und Stößelhub nach VIEHWEGER u. a. [136]

Es bedingen sich die Parameter Hubzahl, Stößelweg, -kraft, -geschwindigkeit und -beschleunigung gegenseitig. Die Leistungskennwerte des Motors und des Getriebes, die Tragzahlen und Steigung des Gewindetriebes, die Tragzahlen der Lager, die Wirkungsgrade und Massenträgheitsmomente aller verbauten Komponenten sowie die linear beschleunigten Massen beeinflussen die Kennwerte des Pressenantriebes. Um die physikalisch bedingten Systemgrenzen zu erweitern, wird jedes Pressenmodul von zwei Pressenantrieben angetrieben. Zusätzlich besteht die Option, bei Bedarf nur einen Antrieb zu verbauen. Durch Koppeln von mehreren Pressenmodulen mit optimierten Stößelbewegungsprofilen wird den Geschwindigkeits-Nachteilen des Servospindelantriebes entgegengewirkt.

Vor allem komplexe Teile mit hohen Ziehanteilen können auf Servospindelpressen trotz deren geringeren erreichbaren Hubzahlen im Vergleich zu konventionellen mechanischen Pressen mit höherer Ausbringung gefertigt werden. Bezüglich dazu nennen GRUNER & PAULI [156 S. 64f] Beispiele aus der Praxis: In einer Presse mit drei Servospindelantrieben wurde die Ausbringung verschiedener Bauteile im Vergleich zu konventionellen Pressen bis zu 109 % gesteigert. Zurückzuführen sei dies auf die frei programmierbaren Stößelbewegungsprofile der Servospindelpresse.

6.1.3 Wandelbare Zuordnung von Teilprozessen und Prozessketten

Aufteilung der Nennkraft auf Pressenmodule und innerhalb der Pressenmodule

Im Standardfall ist jedes Pressenmodul mit zwei gleichen Antrieben ausgestattet. Die Nennkraft wird nicht nur innerhalb der Pressenmodule auf zwei Antriebe aufgeteilt, durch Synchronisieren mehrerer nebeneinander arbeitender Pressenmodule lassen sich Kräfte addieren. Als Folge der Aufteilung auf mehrere Achsen ergeben sich in Summe geringere Massenträgheiten, bei gleichem Energieaufwand werden somit höhere Beschleunigungen erreicht.

Mehrachsige Systeme erfordern synchronisierte Antriebsketten. Zur Ermittlung der Spindelsteigungsfehler-Differenz in einem zweiachsigen System bietet sich ein Soll-Ist-Vergleich der internen Lageregelung mit externer Wegmessung an. Die ermittelten Werte werden als Maschinenparameter in der Steuerung hinterlegt.

Der Pressenantrieb eines Pressenmoduls erreicht durch das Aufteilen auf zwei kleinere Achsen bei gleichbleibender Kraft und Geschwindigkeit höhere Beschleunigungen im Vergleich zu einem einachsigen Antrieb. Dieser Effekt beruht auf dem nichtlinearen Anwachsen der Massenträgheiten von Spindeln und Motoren bei zunehmenden Tragzahlen bzw. Antriebsmomenten.

In Gleichung 9 wird dieser Zusammenhang dargestellt. Der Widerstand gegen eine Änderung der Drehbewegung J eines starren Körpers des Volumens V mit konstanter Dichte ϱ wächst quadratisch mit dem senkrechten Abstand r der Masseteilchen von der Drehachse.

Massenträgheit eines starren Körpers mit konstanter Dichte

$$J = \varrho \int_V r^2 dV \quad (9)$$

Anstatt beispielsweise ein Folgeverbundwerkzeug mit nur einer leistungsstarken, aber trägen Achse anzutreiben, kann das Werkzeug durch mehrere kleinere Achsen bei gleichbleibender Kraft mit höherer Beschleunigung angetrieben werden. Dies erlaubt sehr dynamische Anwendungen. Die Gesamtleistungsaufnahme der Motoren sinkt bei konstanter Kraft und Beschleunigung mit steigender Anzahl der Achsen. [136]

Die Stärke des Systems liegt in der Verteilung der Nennkraft auf mehrere Stufen und der sehr hohen Prozessflexibilität. Das frei programmierbare Stößelbewegungsprofil lässt sich an die Anforderungen unterschiedlicher Teilprozesse anpassen. Dadurch können Bauteilqualität und Ausbringung gesteigert werden. Die Aufteilung des Pressensystems in Pressenmodule erlaubt es, den Fertigungsprozess auf verschiedene Teilprozesse und Teilprozessgruppen zu verteilen und bei sich ändernden Einflussgrößen deren Anordnung zu ändern. Durch die Trennung wird jeder dieser Teilprozesse bzw. jede Teilprozessgruppe für sich optimiert. Kritische Teilprozesse bzw. Teilprozessgruppen können unabhängig von den Prozessen der benachbarten Stufen durchgeführt werden. Werden in einem Teilprozess oder einer Teilprozessgruppe höhere Kräfte benötigt, können mehrere Pressenmodule synchronisiert werden. Folgt beispielsweise eine Schnittstufe auf eine Prägestufe, können beide Operationen unabhängig voneinander optimiert werden. Für den Prägeprozess vorteilhafte Haltezeiten können beliebig programmiert werden. In der folgenden Teilprozessgruppe kann die Schnittqualität durch eine Verringerung der Schnittgeschwindigkeit verbessert und der Schnittschlag gemindert werden. Aufgrund der Trennung der Stufen wirkt sich der Schnittschlag nicht auf den vorhergehenden Prägeprozess aus. Da jedes Pressenmodul über eine eigene Weg- und Kraftsensorik verfügt, kann der Prozess innerhalb des Teilprozesses bzw. der Teilprozessgruppe in engen Grenzen geregelt und überwacht werden. Zusätzlich erlauben Mehrkanal-Messverstärker die Integration weiterer analoger und digitaler Sensoren. [136]

Neben der verbesserten Dynamik und den zusätzlichen Freiheitsgraden bei der Prozessoptimierung erzielt die Aufteilung der Presse in Pressenmodule und der modulare Aufbau des Systems insgesamt weitere positive Effekte. Im Schadensfall einzelner Pressenmodule fällt nicht das gesamte Pressensystem aus, es müssen nur die betreffenden Pressenmodule abgeschaltet werden. Die modulare Struktur des Pressensystems erleichtert den Zusammenbau durch Vormontage sowie die Instandhaltungsarbeiten.

Wandelbare Anordnung von Teilprozessen

Die Aufteilung der Nennkraft des Pressensystems auf mehrere Module erlaubt außerdem die Nutzung von Einzelwerkzeugen, die entweder unabhängig voneinander arbeiten oder miteinander kombiniert werden. So ermöglicht das Pressensystem neben der Nutzung konventioneller kombinierter Werkzeuge wie Folgeverbundwerkzeuge auch eine Fertigung auf unabhängig voneinander arbeitenden Einzelwerkzeugen. Teilprozesse können separiert und Einzelwerkzeugen zugeordnet und mit einem prozessangepassten Stößelbewegungsprofil ausgeführt werden. Es ist nicht notwendig, wie in Folgewerkzeugen Kompromisse zwischen den Teilprozessen zu schaffen oder die Teilprozesse wegen gegensätzlicher Prozessanforderungen in verschiedene Höhenebenen zu stufen. Vorteile bietet die Nutzung von Einzelwerkzeugsätzen ebenfalls bei Bauteilen, die in vielen Varianten gefertigt werden. Diese können durch Austausch der betreffenden Einzelwerkzeuge innerhalb des Werkzeugsatzes abgebildet werden.

Des Weiteren können Einzelwerkzeuge unabhängiger voneinander entwickelt, gefertigt, montiert, geprüft und eingestellt werden. Werkzeugoberteile können unterschiedlich hoch und die Werkzeuge durch die Möglichkeit des horizontalen Positionierens der Pressenmodule auch unterschiedlich tief sein. Die Kopfplatten können hinsichtlich der Bauraum- und Festigkeitsanforderungen der Einzelwerkzeuge ausgelegt werden, sie müssen nicht mit den anderen Werkzeugen des Werkzeugsatzes abgeglichen werden. Somit wird die linear bewegte Masse verringert und die Dynamik erhöht. Die Möglichkeiten der Nutzung von unterschiedlich hohen und tiefen Einzelwerkzeugen und Folgewerkzeugen zeigt Abbildung 6.2.

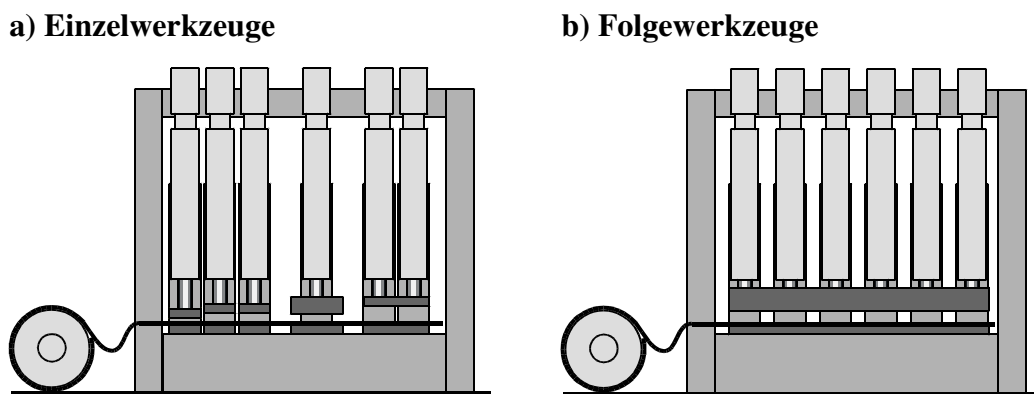


Abbildung 6.2: Nutzung verschiedener Werkzeugarten

Durch den besonders breiten Pressenraum können groß bauende Werkzeuge eingesetzt und gegebenenfalls Zusatzsysteme seitlich der Werkzeuge angebracht werden. Es ist beispielsweise denkbar, dass mehrere Blechstreifen nebeneinander oder versetzt in die Presse einlaufen, getrennt voneinander bearbeitet und anschließend in einer hinteren Stufe gefügt werden.

Sollen externe Prozesse – GROCHE [70] und PAUL [71] beschreiben z. B. die Integration von (Punkt-)Schweiß-, Löt- und Montageprozessen in Umformwerkzeugen – mit der Blechbearbeitung im Pressensystem kombiniert werden, so ist dies aufgrund der unabhängigen Pressenmodule und einstellbaren Stichmaße einfacher möglich.

Durch die vielseitigen Freiheitsgrade, die das Pressensystem bietet, lassen sich auch weitere Prozesse integrieren. Denkbar ist in dieser Hinsicht beispielsweise für kleine Teile die inkrementelle Blechumformung IBU, wie sie von BAMBACH [157] beschrieben wird. Dieses Verfahren erlaubt die wirtschaftliche Fertigung komplex geformter Blechbauteile. Auf dem Pressensystem können die notwendigen Zeitfenster eingehalten werden, da die Prozesszeiten bei der IBU weitaus länger sind als bei der konventionellen Blechumformung.

Durch die Integration dieser Zusatzprozesse entfallen externe Prozesse, Logistikketten und Zwischenlager erübrigen sich somit. Dadurch werden kürzere Durchlaufzeiten, eine höhere Flexibilität durch einfachere Variantenfertigung, kürzere Umrüstzeiten und eine höhere Prozessrobustheit erreicht. Die Zusatzprozesse können unter Einzelwerkzeugen separiert und dann je nach Bedarf ein- und ausgewechselt werden. Notwendige Rastphasen lassen sich problemlos einhalten. Um die Integration von Zusatzprozessen zu erleichtern ist es möglich, im Pressensystem verschiedene Transportsysteme zu nutzen.

Erweiterung des Pressensystems

Der Aufbau des Pressensystems als Baukasten erhöht die Möglichkeiten der Anpassung bei sich ändernden Einflussgrößen, wodurch das Wandlungspotenzial des Pressensystems steigt. Um die Nennkraft des Pressensystems zu erhöhen, können weitere Pressenmodule mit gleicher Nennkraft eingebaut werden. Da die Pressenmodule aller Baugrößen einen unverändert großen Werkzeugeinbauraum haben, wie Abbildung 5.3 zeigt, und über alle Baugrößen die Anschlussabmessungen für die Pressenmodul-Positionierung gleich bleiben, können nicht nur Pressenmodule mit der gleichen Nennkraft innerhalb eines Pressensystems genutzt werden. Es lassen sich auch mit geringem Änderungsaufwand Pressenmodule mit kleineren oder größeren Nennkräften nachträglich einbauen. Neben der Erweiterung der Nennkraft des Pressensystems wird durch zusätzliche Pressenmodule eine nachträgliche Integration von Zusatzprozessen erleichtert. Daneben kann das Pressensystem beispielsweise durch zusätzliche Sicherheitssysteme wie Lichtschranken oder zusätzliche Messsysteme wie externe Kraft- oder Wegmesssysteme erweitert werden. Durch die Erweiterung der Messaufnehmer kann die Prozessüberwachung an wechselnde Anforderungen angepasst werden.

Darüber hinaus vereinfacht sich die zukünftige Anpassung und damit die Wandlungsfähigkeit des Pressensystems. Weitere, bisher noch nicht entwickelte Bausteine können über die vorhandenen Schnittstellen in das Baukastensystem eingegliedert werden. Auf diese Weise können zukünftig beispielsweise Wärmesensoren in das Pressensystem integriert werden. Weitere Zusatzsysteme wie Werkstückhandlingsysteme oder Beölungseinrichtungen können ebenfalls nachgerüstet werden.

6.1.4 Werkzeugwechsel

Der Werkzeugwechsel nach Kapitel 4.3.5, bei dem die Werkzeuge auf einer gemeinsamen Schiene vorpositioniert werden, entkoppelt die Genauigkeit der Werkzeugpositionierung von der Position und Lage der Pressenmodule. Die Positions- und Lagegenauigkeit hängt nur von der Position und Lage der Werkzeuge auf der gemeinsamen Schiene ab. Mithilfe von Messgeräten, Maß- und Formlehren oder Steck- und Klemmsystemen können die Position und Lage der Werkzeuge auf der Schiene schnell eingestellt werden. Auf diese Weise ermöglicht das Werkzeugwechselsystem kurze Rüstzeiten. Die Werkzeuge für ein Bauteil können aufgrund des Schienensystems während der Bearbeitung des vorhergehenden Bauteils vorgerüstet und bei Auftragsende schnell gewechselt werden. Eine unterschiedliche Anordnung der Werkzeuge für Teilprozesse ist möglich, wodurch die wandelbare Anordnung von Teilprozessen unterstützt wird. Nachteilig ist der

erhöhte Aufwand bei einem Wechsel nur eines oder weniger Einzelwerkzeuge. Dazu muss der gesamte Werkzeugsatz aus der Presse entfernt werden. Das Stichmaß zwischen benachbarten Pressenmodulen mit Einzelwerkzeugen muss immer gleich oder ein Vielfaches des kleinsten Abstandes zweier Pressenmodule sein. Werden Werkzeugsätze von mehreren Pressenmodulen angetrieben, kann nach Abbildung 4.26 in Kapitel 4.3.5 der Modulabstand größer oder kleiner als das Stichmaß eingestellt werden.

6.1.5 Prozessüberwachung

Mithilfe der Kraft- und Wegmessung in jedem Pressenantrieb können die Prozesse in engen Grenzen gesteuert, geregelt und überwacht werden. Eine oftmals notwendige Integration der Sensorik für Kräfte in Folgeverbundwerkzeugen und der damit verbundene Aufwand und das Schadensrisiko empfindlicher Messaufnehmer und Kabel entfällt dadurch.

Die in der Füge- und Montagetechnik übliche Überwachung von Kräften und Wegen wurde übernommen, um eine flexible Prozesssteuerung und -überwachung zu ermöglichen. Über einen Mehrkanal-Messverstärker lassen sich weitere Sensoren integrieren und dadurch die Prozessüberwachung auch nachträglich erweitern. So kann beispielsweise ein hochauflösender externer Wegsensor nachgerüstet werden, wenn sehr hohe Genauigkeitsanforderungen an die Wegmessung gestellt werden.

Prozesse können nicht nur durch Erreichen einer Position oder Kraft, sondern durch beliebige Messgrößen geregelt und überwacht werden. Für die Prozessregelung lassen sich außerdem charakteristische Merkmale wie Knickpunkte oder Anstiegsänderungen nutzen. Durch Hüllkurven und Prozessfenster im Kraft-Weg-Verlauf kann der Prozess in engen Grenzen überwacht werden. Verlässt die Kraft-Weg-Kurve den Bereich der Hüllkurven oder werden festgelegte charakteristische Merkmale nicht erreicht, werden Ausschussteile identifiziert. Bei einer reproduzierbaren Charakteristik können Chargenschwankungen berücksichtigt werden. Trotz stark schwankender Prozesskräfte lässt sich mittels variabler Hüllkurven der Prozess in engen Grenzen überwachen. Dazu beschreibt GRÜTZNER [158] anhand der in Abbildung 6.3 dargestellten Überwachung eines Knickbauchprozesses auf einer Servospindelpresse ein Beispiel.

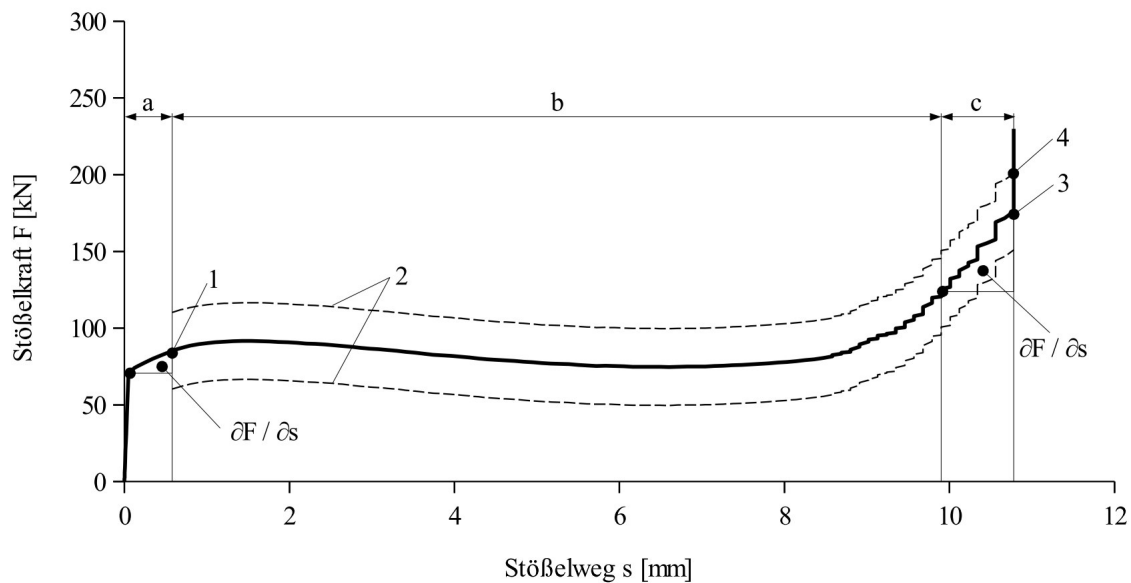


Abbildung 6.3: Überwachung eines Knickbauchprozesses nach GRÜTZNER [158]

Im Bereich *a* wird der Punkt (1) in Abhängigkeit des Steigungsgradienten $\partial F / \partial s$ bestimmt. Dieser bedingt die Startwerte der oberen und unteren Hüllkurven (2) im Bereich *b*, deren Durchbrechen einen fehlerhaften Prozess anzeigt. Dadurch kann auf Schwankungen der Halbzeuge reagiert werden, ohne dass die Hüllkurven auseinandergezogen werden müssen, um Halbzeugtoleranzen abzufangen. Im Bereich *c* wird durch einen weiteren Steigungsgradienten $\partial F / \partial s$ der UT am Punkt (3) ermittelt. Diesem Zielwert kann eine weitere Kraft beaufschlagt werden, bis der Prozess das Abschaltkriterium im Punkt (4) erreicht.

Neben den vielseitigen Möglichkeiten zur Regelung und Überwachung kann der Pressenantrieb auch zum Messen von Wegen und Kräften genutzt werden. Auf diese Weise können u. a. Prozesskräfte ermittelt werden. Chargenschwankungen, beispielsweise der Blechdicke oder von Festigkeitskennwerten, können beim Wechsel des Halbzeuges durch einmaliges Tarieren des UT mittels Kraftregelung oder Blechdickenmessung kompensiert werden. Da über den Lagesensor des Servomotors schneller geregelt wird als über Kraftsensoren, kann somit die Ausbringung erhöht werden. Dazu werden die Folgehübe mit den aktualisierten Parametern weggeregelt und überwacht. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen erlaubte die eingesetzte Technik noch keine Regelung des aktuellen Hubes. Eine Prozessüberwachung in jeder Stufe ermöglicht es, bei fehlerhaften Teilen die Presse sofort anzuhalten und eventuelle Werkzeugschäden durch Doppelbleche oder Fremdkörper zu verhindern.

6.1.6 Eignung im Rahmen der Industrie 4.0 und Wandlungsfähigkeit

Das Pressensystem verfügt durch die Kraft- und Wegsensorik innerhalb jedes Pressenmoduls und die sehr genau steuer- und regelbare Aktorik der Servospindelantriebe mit den frei programmierbaren Stößelbewegungsprofilen über grundlegende Voraussetzungen für den Einsatz im Rahmen der Industrie 4.0. Problemlos ist die Integration von kommunikationsfähigen Systemen wie Bluetooth oder NFC und Systemen zur Datenverarbeitung, wie sie von der Industrie 4.0 gefordert werden. Das Pressensystem kann mit wenig Aufwand zum cyber-physischen System in einer intelligenten Fabrik erweitert werden. Indem es Befehle externer Systeme umsetzt und Informationen sammelt und weiterleitet, lässt es sich gut in Vorgänger- und Folgeprozesse eingliedern.

Durch die vielfältigen Umbau- und Erweiterungsmöglichkeiten ist das Pressensystem besonders wandlungsfähig. Es weist die Kennzeichen der in Kapitel 2.1.7 beschriebenen wandlungsfähigen Produktionssysteme auf. Das Pressensystem lässt sich mit geringem Aufwand umgestalten, um auf veränderte Produktionseinflüsse zu reagieren. Bei Bedarf kann der Anwender das Pressensystem erweitern, indem er weitere Pressenmodule einbaut oder die Maschine um Zusatzsysteme wie Messaufnehmer, Roboter, Lichtschranken, Beölungsanlagen usw. ergänzt. Neben den bereits beschriebenen Möglichkeiten, mit dem Pressensystem eine Vielzahl verschiedenartiger Werkzeuge zu nutzen, ist durch das freie Positionieren der Pressenmodule eine flexible Erweiterung des Pressenraumes in Teiledurchlaufrichtung möglich. Die wandelbare Zuordnung von Teilprozessen wird aufgrund der unterschiedlichen Möglichkeiten, die in Kapitel 6.1.3 bezüglich der Prozessgestaltung und in Kapitel 6.1.4 im Hinblick auf die Möglichkeiten der Fertigung auf Einzelwerkzeugsätzen, unterstützt.

Die in Kapitel 2.1.7 genannten Beispiele wandlungsfähiger Produktionsanlagen – die Prozessintegration und ein lernender Steueralgorithmus, der auf Halbzeugschwankungen reagiert – können ohne hohen Aufwand auf dem Pressensystem umgesetzt werden.

6.2 Einordnung und Einsatzgebiete des Pressensystems

Das entwickelte Pressensystem grenzt sich von den bisher am Markt erhältlichen Servospindelpressen zur Blechbearbeitung ab. Kennzeichnend für das Pressensystem ist die Wandlungsfähigkeit durch den Einzelantrieb in den Pressenmodulen und die Möglichkeit zur Abstandsänderung zwischen diesen. Zusätzlich ist durch die Bauweise eine Erweiterung des Kraft- und Prozessbereiches mittels Ergänzung zusätzlicher Pressenmodule und Integration weiterer Systeme mit geringem Aufwand möglich.

Das Pressensystem stellt eine Sonderform der Umformanlagen dar. Durch die Aufteilung der Nennkraft auf mehrere miteinander koppelbare Pressenmodule kann es sowohl im Folgeverbund als auch asynchron in mehreren Stufen fertigen. Es lassen sich sowohl Einzel- als auch Folge- und Stufenwerkzeuge nutzen. Im Normalfall ist der Abstand zwischen den Stufen von Mehrstufenpressen bzw. Pressen in Pressenlinien nicht veränderbar, das Pressensystem mit den positionierbaren Pressenmodulen bildet aus diesem Grund einen Sonderfall. Durch diese Eigenschaften ermöglicht es eine wandelbare Anordnung von Teilprozessen. Der Teiletransport ist durch Bandvorschub, Roboter oder von der Seite wirkende Transfersysteme möglich. Die Werkzeuge werden außerhalb des Systems gespeichert und von Hand gewechselt. Zusammenfassend ist das Pressensystem als modulare Mehrstufenpresse mit Servospindelantrieb und variablen Stufenabständen einzuordnen.

Das Pressensystem eignet sich wegen der prozessangepassten Stößelbewegungsprofile, der Optimierung der Teilprozesse und der Möglichkeiten zur Prozessintegration vor allem für komplizierte Prozesse und komplexe Bauteilgeometrien unter hoher Produktivität. Diesen Einsatzzweck unterstützen die vielseitigen Möglichkeiten zur Prozessregelung und -überwachung. Darüber hinaus können durch die Aufteilung der Presse in Pressenmodule variantenreiche Bauteile in hoher Produktivität gefertigt werden.

Die durch die Servoantriebe möglichen Zeitfenster erlauben eine Integration weiterer Prozesse wie Schweißen, Löten, Kleben oder Messen innerhalb oder zwischen den Werkzeugen. Schon während des Stanzens können Bauteile wie Stifte, Gewindeeinsätze oder Federn eingebracht werden, sodass innerhalb der Presse Baugruppen gefertigt werden. Möglich sind auch das Befüllen von Hohlräumen, verschiedene Beschichtungsverfahren, eine Schmierstoffeinbringung oder das Etikettieren von Bauteilen. Es kann zusammengefasst werden, dass das Pressensystem aufgrund der hohen Prozessflexibilität und Wandlungsfähigkeit besonders für die Fertigung komplexer Bauteile und Baugruppen mit verschiedenen, auch gegensätzlichen, Prozessanforderungen in kleinen bis mittelgroßen Serien geeignet ist. [135] [136] [159]

Das Pressensystem wurde am Beispiel der Blechbearbeitung durch Umformen, Trennen und Fügen entwickelt und ist auf alle Teile, die mehrstufig gefertigt werden, anwendbar. Es kann neben Stahlwerkstoffen auch mit Nichteisenmetallen und nichtmetallischen Werkstoffen bestückt werden. Ein weiterer denkbarer Einsatz ist die Verarbeitung neuer Werkstoffe und deren Verbunde, die aufgrund prozessangepasster Stößelbewegungsprofile sowie der Prozessüberwachung wirtschaftlich gefertigt werden können. Eine Halbwarm- oder Warmumformung ist nicht vorgesehen. Neben der Serien- und Variantenfertigung kann das Pressensystem auch im Einrichtungs- und Tryout-Betrieb eingesetzt werden. Unter Verwendung des manuellen Verfahrens des Stößels in der Software, dem Joggen sowie der Kraftregelung, ist das Pressensystem zum Tuschieren und Einarbeiten neuer Werkzeuge und Transportsysteme geeignet. Daneben kann das Pressensystem auch als Versuchspresse zur Ermittlung von Prozessparametern eingesetzt werden. Durch den Servospindelantrieb, die interne Kraftregelung und die erweiterbare Regelung durch externe Sensoren können in Versuchen Parameter in engen Abstufungen variiert und deren Einfluss auf den Fertigungsprozess untersucht werden. Die Flexibilität des Pressenraumes, die Eignung verschiedener Werkzeugarten und die Erweiterbarkeit unterstützen den Einsatz als Versuchspresse.

7 Zusammenfassung

Die moderne Umformtechnik ist von vielseitigen Veränderungen betroffen. Bauteilgeometrien werden immer komplexer, während die Varianten zahlreicher werden. Um konkurrenzfähig zu bleiben, müssen Presswerke die Ausbringung erhöhen und ansteigende Energiekosten kompensieren. Pressen müssen wandlungsfähig gestaltet werden, sodass sie bei Bedarf an schwankende Einflussgrößen angepasst werden können. Mit neuartigen Pressen kann auf diese Herausforderungen reagiert werden. Vor diesem Hintergrund sind Servopressen besonders hervorzuheben. Seit Beginn der 1990er Jahre verbreiten sich diese Pressen immer stärker. Insbesondere Servospindelpressen bieten durch die frei anpassbaren Stößelbewegungsprofile, die über den gesamten Stößelhub konstante Stößelkraft sowie die integrierte Messtechnik und die daraus resultierenden Möglichkeiten zur Prozesssteuerung und -überwachung weitreichende Vorteile. Um die begrenzten Kraftbereiche von Servospindelpressen zu erweitern, lassen sich mehrere Servospindelantriebe in einer Presse miteinander kombinieren. Der wandelbare Austausch von Teilprozessen ist einfach möglich, wenn die Stößel separierbar und innerhalb der Presse frei positionierbar sind. Dadurch können die Teilprozesse je nach Bedarf auf mehrere Stößel verteilt oder auf einzelnen Stößeln zusammengefasst werden. Zudem können Teilprozesse aus der Prozesskette ausgegliedert und auf externen Stationen außerhalb der Presse gefertigt werden. Eine weitere Verbesserung der Wandlungsfähigkeit wird erreicht, wenn die Presse modular aufgebaut ist. So kann die Nennkraft der Presse durch die Ergänzung zusätzlicher Pressenstößel mit eigenen Antrieben wandelbar angepasst werden. Die Presse wird dadurch zu einem wandlungsfähigen Pressensystem, das aus mehreren frei positionierbaren Pressenmodulen mit eigenen Pressenantrieben und -stößeln besteht. Das Ziel der Arbeit ist die Umsetzung dieser Lösungs idee: Ein wandlungsfähiges Pressensystem, bestehend aus mehreren frei positionierbaren Pressenmodulen mit Servospindeltrieb, erlaubt neue Freiheitsgrade in der Gestaltung von Umform- und Fügeprozessen.

Zu Beginn der Arbeit wird der Stand der Erkenntnisse untersucht. Umformmaschinen werden hinsichtlich ihrer Einsatzgebiete und Eigenschaften voneinander abgegrenzt. Im Fokus der Recherchen stehen Servopressen, insbesondere Servospindelpressen. Dabei werden die unterschiedlichen Ausführungen von Servopressen miteinander verglichen. Anschließend werden bekannte Servoexzenterpressen und Servospindelpressen zur Blechbearbeitung aufgelistet, die in der Industrie und Forschung eingesetzt werden. Daraufhin werden Servopressen hinsichtlich ihrer Eignung im Rahmen der Industrie 4.0 und als wandlungsfähige Umformmaschinen betrachtet. Eine Grundlage für die Entwicklung des Pressensystems bilden die Untersuchungen des Aufbaus von Servospindelpressen, der Pressenwerkzeuge und von Schutzrechten, welche einen Bezug zu dem

Pressensystem aufweisen. Aus dem Stand der Pressentechnik wird schließlich die Problemstellung abgeleitet. Zu diesem Zweck werden die Eigenschaften der derzeit am Markt erhältlichen Pressen zusammengefasst und Defizite herausgestellt, welche durch die Eigenschaften des zu entwickelnden Pressensystems behoben werden sollen. Im Anschluss an den Stand der Pressentechnik werden verschiedene Methoden beschrieben, die bei der Produktentwicklung des Pressensystems genutzt werden.

Aus dem Stand der Erkenntnisse wird im folgenden Kapitel 3 die Zielsetzung und Vorgehensweise bei der Entwicklung des Pressensystems abgeleitet. Es wird außerdem eine Lösungsidee beschrieben, welche die Grundlage der weiteren Entwicklung bildet.

Im vierten Kapitel wird der Entwicklungsprozess des Pressensystems bis hin zu einem ersten Prototyp beschrieben. Dabei wird nach der Konstruktionsmethodik der VDI 2221 [88] vorgegangen, wie sie im Methodenteil des zweiten Kapitels beschrieben wird. Eine Sammlung der Wünsche und Forderungen in der Anforderungsliste bildet die Grundlage der Konzeptphase. In dieser wird das grundsätzliche Problem formuliert und durch wiederholte Aufgliederung der Funktionen eine Funktionsstruktur aufgestellt. Im nächsten Schritt werden durch Anwendung verschiedener Methoden Wirkprinzipien zum Erfüllen der Funktionen ermittelt. Über eine Vorauswahl in einer Auswahlliste und weiteres Bewerten werden geeignete Wirkprinzipien identifiziert. Diese Wirkprinzipien werden miteinander kombiniert und bis hin zu einer Prinzipiellen Lösung konkretisiert, welche anschließend in einem Bauzusammenhang dargestellt wird. Dieser Entwicklungsschritt schließt die Konzeptphase ab. Unter Beachtung verschiedener Gestaltungsleitlinien wird das Konzept in der darauffolgenden Entwurfsphase ausgestaltet. Zu diesem Zweck wird das Pressensystem in Komponenten und Module gegliedert, die in einer Produktarchitektur dargestellt werden. Auf Basis der Anforderungen, des Bauzusammenhangs und der Produktstruktur werden die Komponenten und Module gestaltet. Beispielhaft wird das Entwerfen des Pressenmoduls und des kuppelbaren Positionierantriebes beschrieben. Nachdem alle Komponenten und Module ausgestaltet sind, wird der Gesamtentwurf fertiggestellt. Um die Funktionsfähigkeit des Pressensystems, insbesondere die Positionierung der Pressenmodule, zu überprüfen, wird ein Prototyp auf Basis der Entwürfe ausgearbeitet, überprüft und notwendige Änderungen abgeleitet.

Um das Wandlungspotenzial des Pressensystems zu erhöhen und weitere positive Effekte zu erzielen, werden im folgenden Kapitel 5 verschiedene Maßnahmen der Produktstrukturierung durchgeführt und erläutert. Der Entwurf wird zu einer Typengruppe weiterentwickelt und auf Grundlage einer modularisierten Produktstruktur zu einem Baukastensystem erweitert.

Zum Abschluss der Arbeit werden die Technologie und verschiedene Funktionen des entwickelten Pressensystems bewertet, um die Neuheiten und den Kundennutzen herauszustellen. Des Weiteren wird das Pressensystem innerhalb der Umformpressen eingeordnet und mögliche Einsatzgebiete werden herausgestellt.

Verschiedene Erkenntnisse konnten aus der Entwicklung des Pressensystems gewonnen werden. Um auf die steigenden Ansprüche an die Umformtechnik zu reagieren, bieten sich im besonderen Maße Servopressen an. Diese erlauben flexible Stößelbewegungsprofile, womit die Prozesse und die Ausbringung optimiert werden. Der Prozess muss nicht mehr an die Maschine angepasst werden, die Maschine kann an den Prozess angepasst werden. Beispielsweise wirkt sich eine Verringerung der Werkzeug-Auftreffgeschwindigkeit positiv auf die Teilequalität, die Lärmbelastung und den Werkzeugverschleiß aus.

Servopressen werden vor allem mit Exzenter- und Spindelantrieb gebaut. Im Allgemeinen erreichen Servoexzenterpressen höhere Geschwindigkeiten und Kräfte als Servospindelpressen. Allerdings stellt der kraftgebundene Spindelantrieb im Gegensatz zum weggebundenen Exzenterantrieb die Nennkraft über den gesamten Stößelhub zur Verfügung. Dadurch erhöhen sich noch einmal die Freiheiten der Werkzeug- und Prozessgestaltung. Bei gleicher Nennkraft lassen sich durch eine Aufteilung auf mehrere Antriebe pro Stößel im Vergleich zu einem Stößel mit nur einem Antrieb höhere Beschleunigungen erreichen. Die Aufteilung der Nennkraft einer Presse auf mehrere positionierbare Pressenmodule ermöglicht zusätzliche Freiheitsgrade bei der Prozessgestaltung: Der Prozess lässt sich in Teilprozesse und Teilprozessgruppen aufteilen, sodass jeder Teilprozess bzw. jede Teilprozessgruppe unabhängig optimiert werden kann. Für gegensätzliche Prozessparameter, beispielsweise beim Umformen und Schneiden, muss kein Kompromiss getroffen werden. Bei dem jeweiligen Teilprozess bzw. Teilprozessgruppe kann das Stößelbewegungsprofil an die Erfordernisse des jeweiligen Prozesses angepasst werden. Davon profitieren die erreichbare Komplexität und die Qualität der Bauteile. Durch die Aufteilung der Nennkraft der Presse auf mehrere, unabhängig voneinander positionierbare Stößel wird zusätzlich eine wandelbare Anordnung von Teilprozessen möglich. Teilprozesse können bei Bedarf ausgetauscht und in ihrer Abfolge verändert werden. Die Prozesskette wird dadurch skalierbar und kann besser optimiert werden, da sie geringeren Restriktionen der Presse unterliegt. Die Synchronisierung mehrerer Pressenmodule erlaubt aber auch weiterhin die Nutzung konventioneller Werkzeuge wie Folgeverbundwerkzeuge oder Transferwerkzeuge. Um die Prozesse auch bei schwankenden Halbzeugparametern in engen Grenzen zu regeln und überwachen, sind innerhalb der Servospindelantriebe die Lagegeber der Servomotoren mit Kraftmesssystemen erweitert.

Die frei programmierbaren Stößelbewegungsprofile, das Positionieren der Pressenmodule und der anpassbare Pressenraum erleichtern die Integration von Prozessen. Notwendige Zeitfenster und Einbauräume für weitere Prozesse wie Schweißen, Löten oder Kleben innerhalb des Pressensystems sind problemlos umsetzbar. So können nicht nur Einzelteile, sondern auch Baugruppen gefertigt werden.

Durch den Aufbau als Baukastensystem kann das Pressensystem mit geringem Aufwand an die unterschiedlichen Anforderungen der Kunden angepasst werden. Dadurch wird das Einsatzspektrum der Maschine erheblich vergrößert. Als Folge wird das Pressensystem aus Kundensicht attraktiver, da dieser die Wahl zwischen verschiedenen Ausführungen des Pressensystems hat und die Maschine auch nachträglich an wechselnde Anforderungen angepasst werden kann.

Die verbaute Sensorik und Aktorik erfüllen die Anforderungen an cyber-physische Systeme als Bestandteil der intelligenten Fabrik innerhalb der Industrie 4.0 besonders gut. Daneben ist die Maschine durch den modularen Aufbau sehr gut wandelbar und kann an veränderte Einflüsse der Produktionsumgebung angepasst werden. Um den Kraftbereich des Pressensystems auch nachträglich zu erhöhen, können zusätzliche Pressenmodule eingebaut werden. Weitere Systeme, beispielsweise für zusätzlich integrierte Fertigungsprozesse oder zum Messen von Prozessparametern, können mit geringem Aufwand nachgerüstet werden.

8 Literaturverzeichnis

- 1 Neugebauer, Reimund u. a.: Intelligente Werkzeuge und Anlagen für die Blechumformung – Mechatronik und Industrie 4.0. In: Fabrik der Zukunft – 5 Jahre Erfahrung mit Servopressen. Tagungsband T 38 des 34. EFB-Kolloquiums Blechverarbeitung in Fellbach am 1.–2.4.2014, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V. (Hrsg.), Hannover, 2014
- 2 Groche, Peter; Avemann, Jörg; Steier, Maximilian: Wandlungsfähigkeit in der blechumformenden Industrie. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb Ausgabe 06/2012, S. 443–451, Carl Hanser Verlag, München, 2012
- 3 Neugebauer, Reimund u. a.: Potentiale der Anwendung und Steuerung von Servopressen. In: Tagungsband 3rd International Conference on Accuracy in Forming Technology ICAFT 2009 und 16. Sächsische Fachtagung Umformtechnik SFU 2009, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Zwickau, 2009
- 4 Groche, Peter u. a.: Industrie 4.0 – Chance auch für die Umformtechnik? In: VDI-Z Ausgabe 06/2014, S. 28–31, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2014
- 5 Weck, Manfred, Brecher, Christian: Maschinenarten und Anwendungsbereiche, 6. Auflage. In: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme Band 1, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2005
- 6 DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: DIN 8582: Fertigungsverfahren Umformen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht. Beuth-Verlag, Berlin, 9/2003
- 7 DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: DIN 8588: Fertigungsverfahren Zerteilen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth-Verlag, Berlin, 9/2003
- 8 DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: DIN 8593 Teil 0: Fertigungsverfahren Fügen – Teil 0: Allgemeines – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth-Verlag, Berlin, 9/2003
- 9 DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: DIN 9869 Blatt 1: Begriffe für Werkzeuge zur Fertigung dünner, vorwiegend flächenbestimmter Werkstücke – Einteilung. Beuth-Verlag, Berlin, 1/1967
- 10 Spur, Günther; Neugebauer, Reimund; Hoffmann, Hartmut: Handbuch Umformen. In: Edition Handbuch der Fertigungstechnik, Carl Hanser Verlag, München, 2012
- 11 Schuler GmbH: Handbuch der Umformtechnik. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1996
- 12 DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: DIN 9870 Blatt 1: Begriffe der Stanztechnik – Fertigungsverfahren und Werkzeuge – Allgemeine Begriffe und alphabetische Übersicht. Beuth-Verlag, Berlin, 10/1974
- 13 Hellwig, Waldemar; Kolbe, Matthias: Spanlose Fertigung Stanzen, 10. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag/Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2012
- 14 Neugebauer, Reimund (Hrsg.): Hydro-Umformung. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2007
- 15 Doege, Eckart; Behrens, Bernd-Arno: Handbuch Umformtechnik – Grundlagen, Technologien, Maschinen, 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2010

- 16 Reissner, Josef: Umformtechnik multimedial – Werkstoffverhalten, Werkstück-versagen, Werkzeuge, Maschinen. Carl Hanser Verlag, München/Wien, 2009
- 17 Brecher, Christian u. a.: Elemente der Werkzeugmaschinen. In: Grote, Karl-Heinrich; Feldhusen, Jörg (Hrsgg.): Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau, 24. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2014
- 18 Tschätsch, Heinz; Dietrich, Jochen: Praxis der Umformtechnik – Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge, 10. Auflage. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2010
- 19 Schepp, Frank: Linearmotorgetriebene Pressen für die Stanztechnik. In: Berichte aus Produktion und Umformtechnik Band 54, Shaker, Aachen, 2002
(zugleich Dissertation Technische Universität Darmstadt 2001)
- 20 Promess Gesellschaft für Montage- und Prüfsysteme mbH: Produktbroschüre Universelles Fügemodul Promess-Rapid. Promess Gesellschaft für Montage- und Prüfsysteme mbH, Berlin, o. J.
- 21 Gesellschaft für Fertigungstechnik Stuttgart: Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart 2000 – Stuttgarter Impulse – Technologien für die Zukunft. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2000
- 22 Schuler GmbH u. a.: Abschlussbericht Verbundprojekt Stanzrapid – Schlüsselkomponenten zur Herstellung von Mikro-Präzisionsbauteilen. Verlag Meisenbach, Bamberg, o. J.
- 23 Paldan, Nikolas Aulin.; Arentoft, Morgens; Eriksen, Rasmus Solmer: Production Equipment and Processes for Bulk Formed Micro Components. In: 10th ESAFORM conference on Material Forming, zitiert nach AIP Conference Proceedings No. 907, S. 463–468, AIP (American Institute of Physics) Publishing LLC, Melville (USA), 2007
- 24 Vollertsen, Frank (Hrsg): Micro Metal Forming. In: Lecture Notes in Production Engineering, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2013
- 25 Hesse, Stefan: Umformmaschinen – Grundlagen der umformenden und zerteilenden Werkzeugmaschinen. Vogel Verlag, Würzburg, 1995
- 26 Birkert, Arndt; Haage, Stefan; Straub, Markus: Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile – Auslegung von Ziehanlagen. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2013
- 27 Dolmetsch, Heiner u. a.: Metalltechnik Fachbildung – Der Werkzeugbau, 14. Auflage. Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2007
- 28 Verein Deutscher Ingenieure e. V.: VDI 3145: Pressen zum Kaltmassivumformen – Mechanische und hydraulische Pressen. Beuth-Verlag, Berlin 7/1984
- 29 Ladwig, Jürgen: Minimierung von Stößelkipfung und -versatz in der Blechbearbeitung. In: Beiträge zur Umformtechnik Band 2, DGM Informationsgesellschaft Verlag, Oberursel, 1994 (zugleich Dissertation Universität Stuttgart 1994)
- 30 DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: DIN 8650: Werkzeugmaschinen – Mechanische Einständerpressen – Abnahmebedingungen. Beuth-Verlag, Berlin, 3/1985
- 31 DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: DIN 8651: Werkzeugmaschinen – Mechanische Zweiständerpressen – Abnahmebedingungen. Beuth-Verlag, Berlin, 5/1990

- 32 DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: DIN 55189 Teil 1: Werkzeugmaschinen – Ermittlung von Kennwerten für Pressen der Blechverarbeitung bei statischer Belastung – Mechanische Pressen. Beuth-Verlag, Berlin, 12/1988
- 33 DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: DIN 55189 Teil 2: Werkzeugmaschinen – Ermittlung von Kennwerten für Pressen der Blechverarbeitung bei statischer Belastung – Hydraulische Pressen. Beuth-Verlag, Berlin, 12/1988
- 34 Verein Deutscher Ingenieure e. V.: VDI 3193 Blatt 2: Hydraulische Pressen zum Kaltmassiv- und Blechumformen – Messanleitung für die Abnahme. Beuth-Verlag, Berlin 7/1986
- 35 DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: DIN 55181: Werkzeugmaschinen – Mechanische Zweiständerpressen – einfachwirkend – mit Nennkräften von 400 kN bis 4000 kN – Baugrößen. Beuth-Verlag, Berlin, 5/1983
- 36 DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: DIN 55184: Werkzeugmaschinen – Mechanische Einständerpressen – Einbauraum für Werkzeuge, Baugrößen, Aufspannplatten, Einlegeplatten, Einlegeringe. Beuth-Verlag, Berlin, 8/1985
- 37 DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: DIN 55185: Werkzeugmaschinen – Mechanische Zweiständer-Schnellläuferpressen – mit Nennkräften von 250 kN bis 4000 kN – Baugrößen. Beuth-Verlag, Berlin, 5/1983
- 38 Viehweger, Bernd: Pressentechnik im Wandel. In: 80 Jahre Wandel der Fabrik – Festschrift anlässlich des 80. Geburtstags von Professor Günter Spur, INPRO Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH, Berlin 2008
- 39 Bruderer AG: Produktbroschüre BSTA 200. Firmenschrift Bruderer AG Frasnacht (Schweiz), 2013
- 40 Siempelkamp Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG: Produktbroschüre Metallforming Presses. Firmenschrift Siempelkamp Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG, Krefeld, o. J.
- 41 M. E. Bruderer AG: Die Spindelpresse wird intelligent. In: Maschinenmarkt Special Baden-Württemberg S. 22, Vogel Business Media, Würzburg, 2011
http://www.meb-press.com/uploads/media/2011-06-14_MM_Maschinenmarkt_Special_Baden-W%C3%BCrttemberg_Juni_2011_01.pdf Aufruf 17.10.2015
- 42 M. E. Bruderer AG: Die ISP. Firmenschrift Die intelligente Spindel-Pressen GmbH Konstanz, o. J.
- 43 Hilleke, Lena.: Neue Möglichkeiten der Produktionstechnik durch Servo-Pressen-Technologie – Teil B. In: Technologien der Fertigungsautomatisierung – Seminarreihe zu ausgewählten Forschungsthemen der industriellen Anwendung. Weyrich, M. (Hrsg.), Universität Siegen, 2013
- 44 Hofele, Hans: Servopressen im Produktionsprozess. In: Servopressen und Werkzeugsysteme zur Blechverarbeitung – Schneller – besser – mehr? Tagungsband T 30 des 29. EFB-Kolloquiums Blechverarbeitung in Bad Boll am 10.–11.3.2009, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V., Hannover, 2009

- 45 Paul, Stephan; Frielinghaus, Markus: Hohe Ausbringung bei großer Flexibilität durch ServoDirekt Technologie – Erfahrungsberichte des Hausgeräteherstellers MIELE. In: Fabrik der Zukunft – 5 Jahre Erfahrung mit Servopressen. Tagungsband T 38 des 34. EFB-Kolloquiums Blechverarbeitung in Fellbach am 1.–2.4.2014, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V. (Hrsg.), Hannover, 2014
- 46 Groche, Peter; Scheitza, Matthias: Konstruktion und Steuerung von Servopressen. Vortrag 29. EFB Kolloquium Blechverarbeitung, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V. Hannover, Bad Boll, 10.–11.3.2009
- 47 Wegener, Frank: Forming Presses (Hydraulic, Mechanical, Servo). In: CIRP Encyclopedia of Production Engineering 2014, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2014
- 48 Scheitza, Matthias: Konzeption eines flexiblen 3D-Servo-Pressensystems und repräsentative Basisanwendungen. In: Berichte aus Produktion und Umformtechnik Band 80, Shaker, Aachen, 2010 (zugleich Dissertation Technische Universität Darmstadt 2009)
- 49 Altan, T.; Groseclose, A.: Servo-Drive Presses – Recent Developments. Konferenzbeitrag 5th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, Kusadasi (Türkei), 2009
- 50 Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V. (Hrsg.): Servopressen und Werkzeugsysteme zur Blechverarbeitung – Schneller – besser – mehr? Tagungsband T 30 des 29. EFB-Kolloquiums Blechverarbeitung in Bad Boll am 10.–11.3.2009, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V., Hannover, 2009
- 51 Osakada, K. u. a.: Mechanical servo press technology for metal forming. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology Volume 60, No. 2, S. 651–672 2011, College International pour la Recherche en Productique, Paris (Frankreich), 2011
- 52 Boden, Jürgen: Entwicklungen bei Servopressen in der Massivumformung. Vortrag Hannover Messe, Schuler Pressen GmbH Göppingen, Hannover, 8.–12.4.2013
- 53 Groche, Peter; Stahlmann, Jörg; Damavandi, Kambiz: Erste Erfahrungen bei dem Einsatz einer Servomotorpresse in der Kaltmassivumformung. Konferenzbeitrag 24. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer, VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf, 18.–19.2.2009
- 54 Finus, Frauke: Mit der Servospindelpresse auf dem Anhänger in Deutschland unterwegs. In: Maschinenmarkt, Vogel Business Media, Würzburg, 2014, <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/umformtechnik/articles/469481/> Aufruf 17.10.2015
- 55 Kuhn, Dietmar: Rollengewindeantrieb als Besonderheit einer neuen Pressengeneration. In: blechnet, Vogel Business Media, Würzburg, 2010, <http://www.blechnet.com/themen/umformen/articles/289975/> Aufruf 17.10.2015
- 56 Gruner, Mike P.: Multiservopresse setzt mit neuem Antrieb technische Akzente. In: Maschinenmarkt, Vogel Business Media, Würzburg, 2014, <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/umformtechnik/articles/250176/> Aufruf 17.10.2015
- 57 H&T ProduktionsTechnologie GmbH: Produktbroschüre Baureihen ServoSpindelPresse. Firmenschrift H&T ProduktionsTechnologie GmbH Crimmitschau, o. J.

- 58 Hoden Seimitsu Kako Kenkyusho Co., LTD: Produktbroschüre ZENFormer. Firmenschrift Hoden Seimitsu Kaki Kenkyusho Co., LTD Zama-Shi (Japan), o. J.
- 59 Hoden Seimitsu Kako Kenkyusho Co., LTD: Produktbroschüre ZENFormer nano. Firmenschrift Hoden Seimitsu Kaki Kenkyusho Co., LTD Zama-Shi (Japan), o. J.
- 60 Hoden Seimitsu Kako Kenkyusho Co., LTD: Produktbroschüre Divo: Digital Servo Press. Firmenschrift Hoden Seimitsu Kaki Kenkyusho Co., LTD Zama-Shi (Japan), o. J.
- 61 Miyoshi, K.: Current trends in free motion presses. Konferenzbeitrag 3rd International Seminar on Precision Forging, The Japan Society for Technology of Plasticity, Nagoya (Japan), 3.3.2004
- 62 MC Machinery Systems, INC: Produktbroschüre Diamond BB Series/BH Series. Firmenschrift MC Machinery Systems, INC, Wood Dale (USA), o. J.
- 63 Mauermann, Reinhard; Müller, Peter: Synchroziehen – eine Tiefziehvariante. In: UTFscience Ausgabe 2/2010, Verlag Meisenbach, Bamberg, 2010
- 64 Dunkes, Ralf; Mauermann Reinhard: Synchroziehen – eine Vision für das Presswerk. Konferenzbeitrag Forming in Car Body Engineering 2011: The press plant facing shifting requirements, Automotive Circle International o. O., Bad Nauheim, 27.–28.9.2011
- 65 Fraunhofer IWU: Innovationspotentiale nutzen. Pressemitteilung Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz, 2011
- 66 Schuler GmbH: Servopresse für Forschungszwecke. Pressemitteilung Schuler GmbH, Göppingen, 2013
- 67 Schuler GmbH: IFU installiert Servo-Kniehebelpresse. Pressemitteilung Schuler GmbH, Göppingen, 2014
- 68 Institut für Umformtechnik: Jahresbericht 2013. Institut für Umformtechnik Universität Stuttgart, Stuttgart, o. J.
- 69 Kaiser, Stefan u. a.: Schlussbericht Verbundprojekt Effizienz im Energiemanagement mit elektrischer Energiespeicherung in der Umformtechnik (E4U). Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin, 2012
- 70 Groche, Peter: Meilensteine auf dem Weg zur wandlungsfähigen Blechumformung. Vortrag Abschlussveranstaltung Forschungsprojekt Formäleon, Schuler Pressen GmbH Göppingen, Erfurt, 12.9.2013
- 71 Paul, Stephan: Wandlungsfähige Anwendungen im Presswerk. Vortrag Abschlussveranstaltung Forschungsprojekt Formäleon, Schuler Pressen GmbH Göppingen, Erfurt, 12.9.2013
- 72 Kagermann, Henning; Lukas, Wolf-Dieter, Wahlster, Wolfgang: Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. Industriellen Revolution. In: VDI Nachrichten Ausgabe 13/2011. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2011
- 73 Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit (Hrsgg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik – Anwendungen, Technologien, Migration. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014
- 74 BITKOM e. V. Berlin; VDMS e. V. Frankfurt am Main; ZVEI e. V. Frankfurt am Main (Hrsgg.): Umsetzungsstrategie Industrie 4.0 – Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0. o. O., 2015

- 75 Russwurm, Siegfried: Mit Siemens die Zukunft der Produktion gestalten – Auf dem Weg zu Industrie 4.0. Pressekonferenz Hannover Messe, Siemens AG München, Hannover, 8.4.2013
- 76 o. V.: Intelligente Stanz-Biege-Serienproduktion: Ein neu entwickeltes Stanz-Biege-Werkzeug korrigiert sich selbst und verhindert so Ausschuss. In: BBR – Bänder/Bleche/Rohre Ausgabe 10/2012 S. 172. Verlag Heinrich Publikationen GmbH, Gilching, 2012
- 77 Itasse, Stéphane: Umformtechnik ist bereits bei Industrie 4.0 angekommen. In: Maschinenmarkt, Vogel Business Media, Würzburg, 2015, <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/blechumformung/articles/500053/> Aufruf 17.10.2015
- 78 Nyhuis, Peter; Reinhart, Gunther; Abele, Eberhard (Hrsgg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. PZH-Verlag, Garbsen, 2008
- 79 Zäh, Michael F.; Möller, Niklas.; Vogl, Wolfgang: Symbiosis of Changeable and Virtual Production – The Emperor’s New Clothes or Key Factor for Future Success? In: Proceedings of the International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production, Herbert Utz Verlag, München, 2005
- 80 Wiendahl, Hans-Peter; Reichardt, Jürgen; Nyhuis, Peter: Handbuch Fabrikplanung. Carl Hanser Verlag München/Wien, 2009
- 81 Berding, Jens; Grützner, Philip: Mechanische Fügetechnik mit Servo-Spindel-Pressen. Vortrag 5. Fügetechnisches Gemeinschaftskolloquium – Gemeinsame Forschung in der Mechanischen Fügetechnik, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V. Hannover, Paderborn, 8.–9.12.2015
- 82 Kief, Hans B.; Roschiwal, Helmut A. (Hrsg.): CNC-Handbuch. Carl Hanser Verlag, München, 2013
- 83 Probst, Uwe: Servoantriebe in der Automatisierungstechnik. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- 84 Kurrein, Max: Die Werkzeuge und Arbeitsverfahren der Pressen. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1914
- 85 Oehler, Gerhard, Kaiser, Fritz: Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge, 7. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1993
- 86 Klocke, Fritz; König, Wilfried: Umformen, 5. Auflage. In: Fertigungsverfahren Band 4, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2006
- 87 DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: DIN 9870 Blatt 2: Begriffe der Stanztechnik – Fertigungsverfahren und Werkzeuge – Fertigungsverfahren und Werkzeuge zum Zerteilen. Beuth-Verlag, Berlin, 10/1972
- 88 Verein Deutscher Ingenieure e. V.: VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Beuth-Verlag, Berlin 5/1993
- 89 Naefe, Paul: Einführung in das methodische Konstruieren. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009
- 90 Theumert, Hans; Fleischer, Bernhard: Entwickeln Konstruieren Berechnen. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2007
- 91 Roth, Karlheinz: Konstruktionslehre, 3. Auflage. In: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen Band 1, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2000

- 92 Ponn, Josef, Lindemann, Udo: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte, 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2011
- 93 Lindemann, Udo: Methodische Entwicklung technischer Produkte, 3. Auflage. Springer-Verlag, Berlin / Heidelberg, 2009
- 94 Pahl, Gerhard u. a.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung/Methoden und Anwendung, 7. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2007
- 95 Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich (Hrsgg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, 8. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2013
- 96 Hinterhuber, Hans H.; Matzler, Kurt: Kundenorientierte Unternehmensführung – Kundenorientierung, Kundenzufriedenheit, Kundenbindung, 4. Auflage. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2004
- 97 Verein Deutscher Ingenieure e. V.: VDI 2221 Blatt 1: Konstruktionsmethodik – Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Beuth-Verlag, Berlin 6/1997
- 98 Hölzing, Jörg A.; Die Kano-Theorie der Kundenzufriedenheitsmessung. In: Gabler Edition Wissenschaft, Gabler/GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2008 (zugleich Dissertation Universität Mannheim 2007)
- 99 Hippel, Eric von: Lead Users: A source of novel product concepts. In: Management Science Volume 32, No.7, S. 791–805, INFORMS Institute for Operations Research and the Management Sciences, Catonsville (USA), 1986
- 100 Linstone, Harold A.; Turoff, Murray: The Delphi Method – Techniques and Applications. Addison-Wesley Educational Publishers Inc, Boston (USA), 1975 (Nachdruck o. O., 2002)
- 101 Dalkey, Norman; Helmer, Olaf: An experimental application of the Delphi Method to the use of experts. Memorandum The Rand Cooperation Santa Monica (USA), 1962
- 102 Orloff, Michael A.: Grundlagen der klassischen TRIZ, 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2005
- 103 Rodenacker, Wolf G.: Methodisches Konstruieren, 2. Auflage. In: Konstruktionsbücher Band 27, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1976
- 104 Zwicky, Fritz: Entdecken Erfinden Forschen – Im morphologischen Weltbild, 2. Auflage. Verlag Baeschlin, Glarus, 1989
- 105 Breiing, Alois; Knosala, Ryszard: Bewerten technischer Systeme. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 1997
- 106 Jakoby, Walter: Projektmanagement für Ingenieure, 2. Auflage. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013
- 107 Schuh, Günther; Klappert, Sascha (Hrsgg.): Technologiemanagement, 2. Auflage. In: Handbuch Produktion und Management Band 2, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2011
- 108 VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (Hrsg.): Wertanalyse – das Tool im Value Management, 6. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2011, korrigierter Nachdruck 2011

- 109 Bronner, Albert; Herr, Stephan: Vereinfachte Wertanalyse, 4. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2006
- 110 Heege, Franz: Wertanalyse, 2. Auflage. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 1991
- 111 Verein Deutscher Ingenieure e. V.: VDI 2225 Blatt 3: Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Technisch-wirtschaftliche Bewertung. Beuth-Verlag, Berlin 11/1998
- 112 Verein Deutscher Ingenieure e. V.: VDI 2225 Blatt 1: Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Vereinfachte Kostenermittlung. Beuth-Verlag, Berlin 11/1997
- 113 Alisch, Katrin; Arentzen, Ute; Winter, Eggert (Schriftleitung): Gabler Wirtschaftslexikon A–D, 16. Auflage. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2004
- 114 Saaty, Thomas L.; Vargas, Luis G.: Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process, 2. Auflage. In: International Series in Operations Research & Management Science Band 175, Springer Science+Business Media, New York, 2012
- 115 Herrmann, Christoph (Hrsg.) u. a.: Strategisches Industriegüterdesign – Innovation und Wachstum durch Gestaltung. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2009
- 116 Kalweit, Andreas (Hrsg.) u. a.: Handbuch für Technisches Produktdesign – Material und Fertigung – Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2006
- 117 Klöcker, Ingo: Produktgestaltung – Aufgabe, Kriterien, Ausführung. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1981
- 118 Seeger, Hartmut: Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme – Industrial Design Engineering, 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2005
- 119 Vajna, Sándor (Hrsg.): Integrated Design Engineering – Ein interdisziplinäres Modell für Produktentwicklung. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2014
- 120 Verein Deutscher Ingenieure e. V.: VDI 2424 Blatt 1: Industrial Design – Grundlagen, Begriffe, Wirkungsweisen. Beuth-Verlag, Berlin 5/1986
- 121 Verein Deutscher Ingenieure e. V.: VDI 2424 Blatt 2: Industrial Design – Grundlagen, Begriffe, Wirkungsweisen – Darstellung an Beispielen. Beuth-Verlag, Berlin 5/1986
- 122 Ulrich, Karl: The role of product architecture in the manufacturing firm. In: Research Policy Volume 24, Issue 3, S. 419 – 440, Elsevier B. V., o. O. 1995
- 123 Rapp, Thomas: Produktstrukturierung – Komplexitätsmanagement durch modulare Produktstrukturen und -plattformen. In: Gabler Edition Wissenschaft, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 1999 (zugleich Dissertation Universität St. Gallen 1999)
- 124 Schuh, Günther: Produktkomplexität managen – Strategien/Methoden/Tools, 2. Auflage. Carl Hanser Verlag, München/Wien, 2005
- 125 Conrad, Klaus-Jörg: Grundlagen der Konstruktionslehre, 4. Auflage. Carl Hanser Verlag, München, 2008
- 126 Eversheim, Walter; Schuh, Günther (Hrsgg.): Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2005

- 127 Schönsleben, Paul: Integrales Logistikmanagement: Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend, 6. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2011
- 128 Renner, Ingo: Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil. Dissertation Technische Universität München, 2007
- 129 Koller, Rudolf: Konstruktionslehre für den Maschinenbau – Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen, 4. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1998
- 130 Koller, Rudolf: Konstruktionslehre für den Maschinenbau – Grundlagen des methodischen Konstruierens, 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1985
- 131 Göpfert, Jan: Modulare Produktentwicklung – Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation. In: Gabler Edition Wissenschaft, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 1998 (zugleich Dissertation Ludwig-Maximilians-Universität München 1998)
- 132 Stützel, P.: E-Gestell-Pressen ohne Winkelauffederung. In: Blech InForm 1/2001, Carl Hanser Verlag, München, 2001
zitiert nach Conrad, Klaus-Jörg: Taschenbuch der Werkzeugmaschinen, S. 309, 3. Auflage. Carl Hanser Verlag, München, 2015
- 133 Ehrlenspiel, Klaus: Integrierte Produktentwicklung, 4. Auflage. Carl Hanser Verlag, München Wien, 2009
- 134 Weck, Manfred, Brecher, Christian: Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose, 6. Auflage. In: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme Band 3, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2006
- 135 Viehweger, Bernd; Grützner, Philip; Berding, Jens: Stand der Servospindelpresstechnik am Beispiel eines modularen Systems. Vortrag 34. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V. (Hrsg.), Fellbach, 1.–2.4.2014
- 136 Viehweger, Bernd; Grützner, Philip; Berding, Jens: Stand der Servospindelpresstechnik am Beispiel eines modularen Systems. In: Fabrik der Zukunft – 5 Jahre Erfahrung mit Servopressen. Tagungsband T 38 des 34. EFB-Kolloquiums Blechverarbeitung in Fellbach am 1.–2.4.2014, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V. (Hrsg.), Hannover, 2014
- 137 Verein Deutscher Ingenieure e. V.: VDI 2223: Methodisches Entwerfen Technischer Produkte. Beuth-Verlag, Berlin 1/2004
- 138 Kienzle, Otto: Normungszahlen. In: Wissenschaftliche Normung Band 2, Springer Verlag, Berlin Göttingen Heidelberg, 1950
- 139 Ries, Clemens: Normung nach Normzahlen. In: Abhandlungen aus dem Industrieseminar der Universität zu Köln, Heft 16, Duncker & Humblot, Berlin, 1962
- 140 Strahinger, Wilhelm: Zauberwelt der Normzahlen. Verl.- u. Wirtschaftsges. d. Elektrizitätswerke, Frankfurt am Main, 1952
- 141 DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: DIN 323 Blatt 1: Normzahlen und Normzahlreihen – Hauptwerte, Genauwerte, Rundwerte. Beuth-Verlag, Berlin, 8/1974
- 142 DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: DIN 323 Blatt 2: Normzahlen und Normzahlreihen – Einführung. Beuth-Verlag Berlin, 11/1974

- 143 Pawlowski, Juri: Die Ähnlichkeitstheorie in der physikalisch-technischen Forschung – Grundlagen und Anwendung. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1971
- 144 Stichlmair, Johann: Kennzahlen und Ähnlichkeitsgesetze im Ingenieurwesen. Altos-Verlag, Essen, 1990
- 145 Eigner, Martin; Roubanov, Daniil; Zafirov, Radoslav (Hrsgg.): Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2014
- 146 Schuh, Günther: Lean Innovation. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2012
- 147 Schuh, Günther (Hrsg.): Innovationsmanagement, 2. Auflage. In: Handbuch Produktion und Management Band 3, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2012
- 148 Blees, Christoph: Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien. Dissertation Technische Universität Hamburg-Harburg, 2011
- 149 Pimmler, Thomas U.; Eppinger, Steven D.: Integration Analysis of Product Decompositions. In: Proceedings of the 6th Design Theory and Methodology Conference, American Society of Mechanical Engineers, New York (USA), 1994
- 150 Zühlke, Detlef: Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen – Ueware Engineering für technische Systeme, 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2012
- 151 Breidert, Joachim: Schnittstellengestaltung für die Baukastensynthese mit Beispielen aus der Formgedächtnisaktorik. In: Schriftenreihe Institut für Konstruktionsmethodik Band 07.4, Shaker Verlag Aachen, 2007 (zugleich Dissertation Ruhr-Universität Bochum 2006)
- 152 Stechert, Carsten: Modellierung komplexer Anforderungen. Dissertation Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2010
- 153 Gruner, Mike P.; Mauermann, Reinhard: Erweiterte Möglichkeiten in der Anwendung von Servospindelpressen. Vortrag Kongress Stanztechnik, KIST Kompetenz- und Innovationszentrum für die StanzTechnologie Dortmund e. V., Dortmund, 27.–28.4.2009
- 154 Landowski, James: Sizing up servo presses. In: Stamping Jurnal Ausgabe 4/2004 S. 12 – 14. Fabricators & Manufacturers Association Intl. , Rockford (USA), 2004
- 155 Hirsch, Andreas: Werkzeugmaschinen – Grundlagen, Auslegung, Ausführungsbeispiele, 2. Auflage. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2012
- 156 Gruner, Mike P.; Pauli, Franz-Bernd: Praxiserfahrungen und Potentiale in der Nutzung von Servospindelpressen. In: Fabrik der Zukunft – 5 Jahre Erfahrung mit Servopressen. Tagungsband T 38 des 34. EFB-Kolloquiums Blechverarbeitung in Fellbach am 1.–2.4.2014, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V. (Hrsg.), Hannover, 2014
- 157 Bambach, Markus u. a.: Modellierung inkrementeller Massiv- und Blechumformung. In: Der Zukunft Form geben. Tagungsband zum 22. Aachener Stahlkolloquium in Aachen am 8.–9.3.2007, Hirth, Gerhard (Hrsg.), Aachen, 2007
- 158 Grützner, Philip: Prozessentwicklung für das Fügen durch Knickbauchen. In: Forschungsberichte Leichtbau Band 7, Winter-Industries, Berlin, 2014 (zugleich Dissertation Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 2014)
- 159 Viehweger, Bernd; Grützner, Philip; Berding, Jens: Modulares Pressensystem. In: Blech/Rohre/Profile Ausgabe 5/2012 S. 42f. Meisenbach GmbH, Bamberg, 2012

9 Anhang

Aktenzeichen	Bezeichnung	Art	Status
DE 10 2004 054 836 B4	Elektrische Pressvorrichtung	P	a
DE 10 2009 006 357 A1	Schiebespindelstanze	P	a
DE 10 2011 118 369 A1	Spindelpresse	P	a
DE 102 18 633 B3	Presse	P	e
DE 102 97 808 T5	Presse	P	e
DE 20 2012 101 609 U1	Vorrichtung zum Einpressen von Nagelplatten	G	a
DE 20 210 007 238 U1	Servospindelpresse	G	a
DE 201 08 706 U1	Presse mit einer elektrischen Antriebseinrichtung	G	e
EP 0482 360 B1	Motorgetriebene Presse mit Kraft- und Wegsensoren	P	e
EP 0774 173 B1	Anlage mit mehreren Anpressvorrichtungen für die Vorbereitung von elektrischen Kabelbäumen	P	e
EP 1 082 185 B1	Tiefziehpresse mit durch Gewindespindel und Spindelmutter angetriebene [sic] Pressenbär sowie Ziehkissen	P	a
EP 2 099 584 A0	Joining Unit	P	a
EP 2 161 094 B1	Vorrichtung und Verfahren zum Bearbeiten, insbesondere Schweißen, eines längs durch die Vorrichtung transportierten Profils	P	a
EP 2 756 893 A1	Materialbearbeitungsvorrichtung, insbesondere Umformmaschine	P	a
a... angemeldet/gültig e... erloschen/nicht erteilt G... Gebrauchsmuster P... Patent			

Abbildung 9.1: Schutzrechte¹²

¹² Der Stichtag der Gültigkeit ist der 17.02.2015. Innerhalb der Schutzrechtschriften zitierte andere Patente, Gebrauchsmuster oder sonstige Quellen werden in dieser Aufstellung nicht zusätzlich aufgeführt, sofern diese technisch ähnliche Lösungen beinhalten.

	Bandhaspel	Bandvorschub + Streifenheber	Abfallrutsche	Teilerutsche	Werkzeug	El. Schwenkspanner	Schienen-einschub	Rollenschienenführung	O-Gestell	Servospindel-antrieb	Interner DMS-Kraftsensor	Panel-PC	Schaltschrank (Pressenmodul)	Schaltschrank (Positionierung)	2-Stützen-Gestell	Umhausung	Kuppelbarer Positionierantrieb	Schienenbremse	Linear-Gleitführung	Servomotor
Bandhaspel		+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandvorschub + Streifenheber	+		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abfallrutsche	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Teilerutsche	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Werkzeug	0	0	0	0		+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
El. Schwenkspanner	0	0	0	0	+		+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Schienen-einschub	0	0	0	0	+	+		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rollenschienenführung	0	0	0	0	0	0	0		+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O-Gestell	0	0	0	0	0	0	0	+		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Servospindel-antrieb	0	0	0	0	0	0	0	0	0		+	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Interner DMS-Kraftsensor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Panel-PC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		+	+	0	0	0	0	0	0
Schaltschrank (Pressenmodul)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+		+	0	0	0	0	0	0
Schaltschrank (Positionierung)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+		0	0	0	0	0	0
2-Stützen-Gestell	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
Umhausung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
Kuppelbarer Positionierantrieb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		+	+	+
Schienenbremse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+		+	+
Linear-Gleitführung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+		+
Servomotor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	

+... erforderlich
 0... möglich
 -... nicht möglich

Abbildung 9.2: Kombinationslogik

